

**INFORME
PROYECTO CASCADA**

**Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en
sistemas agroforestales con café, incluyendo la fenología
y fisiología de los cafetos**



Fomentado por el:



Ministerio Federal
de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza,
Obras Públicas y Seguridad Nuclear

en virtud de una resolución del
Parlamento de la República Federal de Alemania

Rogelio Antonio Villarreyña Acuña

Revisado por:

**Karel Van den Meersche
Bruno Rapidel
Jacques Avelino**

28 de julio del 2016

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
2.	Aspectos generales de los suelos de Latinoamérica y el Caribe.....	2
2.1.	Principales factores que influyen en la formación del suelo.....	3
2.2.	Tipo de suelos recomendables para el cultivo del café.....	3
2.3.	Requerimientos nutricionales para el café.....	4
2.4.	Nivel de humedad del suelo necesario para el cultivo de café	4
2.5.	Pérdidas de suelo por erosión en los cafetales	4
3.	Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo dentro del cafetal	6
3.1.	Efecto de los árboles sombra sobre la materia orgánica del suelo: cantidad de hojarasca y ramas en el suelo.....	6
3.2.	Efecto de los árboles de sombra sobre la humedad del suelo (balance hídrico).....	7
3.3.	Efecto de los árboles de sombra sobre la energía cinética de las gotas de lluvia y su impacto sobre el suelo.....	8
3.4.	Efecto de los árboles de sombra sobre la erosión de los suelos	9
4.	Efecto de los árboles de sombra sobre el reciclaje de nutrientes y nutrición de los cafetos	10
4.1.	Ciclo de nutrientes en el cafetal (ciclo del nitrógeno).....	11
4.2.	Árboles de sombra y reciclaje de nutrientes del suelo dentro del cafetal.....	12
4.3.	La calidad y cuantidad de materia orgánica afectan el proceso de mineralización y nitrificación	13
4.4.	Arboles fijadores de nitrógeno: el árbol al servicio del cultivo	13
4.5.	Efecto de los árboles de sombra sobre el balance de nutrientes	14
4.6.	Un sistema radicular profundo favorece el reciclaje de nutrientes	15
5.	Efecto de los árboles de sombra sobre la fenología y fisiología del café	15
5.1.	Efecto de los árboles de sombra sobre el crecimiento de los cafetos	16
5.2.	Efecto de los árboles de sombra sobre la floración	16
5.3.	Efecto de la sombra sobre la producción (tocar la parte sombra_rendimiento).....	16
6.	Efecto de la sombra sobre la biología del suelo	17
7.	Conclusión	18
8.	Agradecimientos.....	19
9.	Literatura citada	20
10.	Anexos	24

1. Introducción

La variabilidad climática y el cambio climático ya son una realidad en Centroamérica y en el mundo, teniendo un impacto sobre el sector agrícola, con daños evidentes sobre la producción de alimentos. Los eventos extremos son cada vez más frecuentes (fuertes lluvias, sequías, olas de calor, entre otros). En países como Nicaragua y otros países de Centroamérica, se prevé, para el año 2030, un aumento en la temperatura media anual de 1.4°C en promedio (Bouroncle *et al.* 2014) y para el 2050, una disminución de la precipitación anual de 70 mm (Ovalle-Rivera *et al.* 2015), lo que afectará severamente a este sector vulnerable como lo es la agricultura.

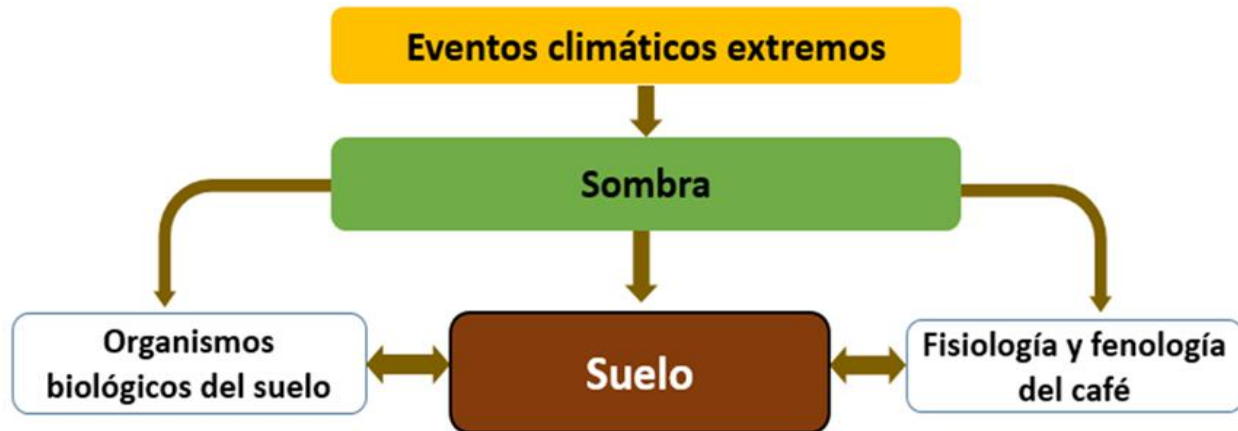


Figura 1. Esquema representativo de la relación entre la sombra, el suelo, la fisiología y fenología del café y los organismos biológicos del suelo.

El café ocupa un lugar importante en la economía de los países centroamericanos, lo cual es preocupante, porque al igual que todos los cultivos, el café será fuertemente afectado. Estudios realizados demuestran que el café es uno de los cultivos más sensibles a los cambios del clima y se prevé, para el año 2030, una disminución de las áreas aptas para este cultivo, sobre todo en la región centroamericana (Ovalle-Rivera *et al.* 2015; Bouroncle *et al.* 2014). Así mismo, se prevé que estos cambios del clima tengan un impacto sobre los suelos de pequeñas fincas. Un impacto significativo del cambio climático para la producción de las pequeñas fincas es la pérdida de materia orgánica del suelo. Temperaturas más altas pueden acelerar la descomposición de materia orgánica e incrementar las tasas de otros procesos del suelo que afecten su fertilidad. Bajo un suelo más seco, las condiciones de crecimiento de raíces y la descomposición de materia orgánica se suprimen significativamente, y dado que la cobertura del suelo disminuye, la vulnerabilidad a la erosión por viento incrementa, especialmente si los vientos se intensifican, lo que puede ser mucho más problemático en terrenos de ladera (Rosenzweig y Hillel 1998).

Ante esta realidad y considerando la importancia del rubro café para los ingresos de muchas familias campesinas, se hace cada vez más indispensable la búsqueda de prácticas de adaptación para este sistema productivo. La incorporación de árboles de sombra en los cafetales se presenta como una buena alternativa de adaptación, para amortiguar los efectos de eventos climáticos extremos, y reducir los riesgos que enfrenta la caficultura del futuro. Esta argumentación hace parte de una lógica de fortalecer los servicios ecosistémicos en agro-ecosistemas a través de la agroforestería. Entre los servicios directos se mencionan, la producción de provisiones (alimentos) (servicios de aprovechamiento) o la regulación de ciclos como las inundaciones, degradación de los suelos, plagas y enfermedades (servicios de

regulación). Mientras, en los beneficios indirectos se destaca su colaboración en la fotosíntesis, formación y almacenamiento de materia orgánica, ciclo de nutrientes, la creación y asimilación del suelo (todos, servicios de apoyo), entre otros (Ash *et al.* 2010). Entonces, conociendo la importancia de los cafetales sombreados ante los eventos climáticos y el aporte a los servicios ecosistémicos, es importante indagar sobre el efecto directo del uso de árboles de sombra sobre el suelo dentro del cafetal, y a la vez su repercusión sobre la fenología y fisiología de los cafetos. Como contribución a esas necesidades, nos damos a la tarea de hacer una revisión de estudios que explican la relación entre los árboles de sombra y la nutrición del suelo (principalmente el nitrógeno del suelo), con el fin de que sea puesto a disposición de técnicos y otros usuarios potenciales.

2. Aspectos generales de los suelos de Latinoamérica y el Caribe

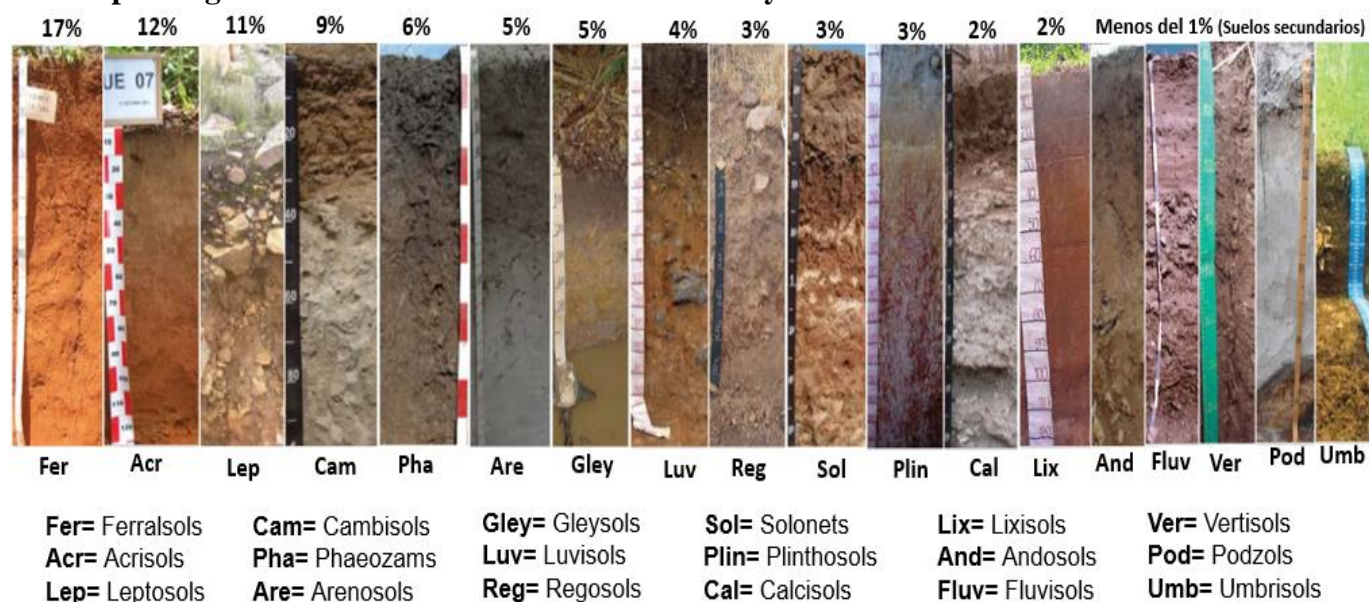


Figura 2. Grupos de suelos de referencia en América Latina y el Caribe, ordenados según su proporción (en %) con respecto a la superficie de suelo total (Clasificación FAO-UNESCO). Los últimos 5 grupos de suelo y otros que no están reflejados (suelos secundarios), ocupan cada uno, el 1% o menos de la superficie total de suelo. Fuente: Gardi *et al.* (2014).

Los suelos forman la piel de la tierra, una capa (corteza) extremadamente frágil y friable que resulta de la acción conjunta de procesos físicos, químicos y biológicos (meteorización) sobre el medio original (la roca madre). Por lo tanto, el suelo se compone de una mezcla compleja de partículas minerales y orgánicas. Su espesor puede variar desde unos pocos milímetros (en pendientes muy pronunciadas) hasta varios metros (en terrenos planos). Los suelos son el sistema de soporte de la vida, proporcionan el anclaje de las raíces de las plantas, retienen el agua y los nutrientes. Los suelos son el hogar de miles de microorganismos que fijan el nitrógeno y descomponen la materia orgánica y otros animales microscópicos; así como también, las lombrices de tierra que juegan también un papel importante en la descomposición de la materia orgánica. El suelo también es capaz de almacenar grandes cantidades de carbono orgánico que amortigua contra los contaminantes, protegiendo así la calidad de las aguas subterráneas (Gardi *et al.* 2014).

Se cuenta con 32 grupos de suelos de referencia a nivel mundial (Clasificación FAO-UNESCO). Estos 32 grupos de suelos de referencia en el mundo están presentes en Latinoamérica y el Caribe (LAC), en

proporciones diferenciadas sobre la superficie total del suelo, lo que refleja la gran diversidad de suelos en LAC. En la figura 2 se muestran los suelos en orden de mayor a menor según su proporción (en porcentaje), con base al total de suelo de ALC (todos los primarios y algunos secundarios) (Gardi *et al.* 2014).

2.1. Principales factores que influyen en la formación del suelo

- 1) **Material parental:** es el material geológico inalterado, representado generalmente por la roca madre o por un material transportado y depositado. Se compone de minerales, los cuales pueden estar consolidados o no, que sufren la acción de otros factores a lo largo del tiempo, manteniéndose en parte inalterados y en parte sometidos a la meteorización física, química o biológica.
- 2) **Relieve:** el proceso a través del cual se forma el suelo (pedogénesis), influye en el relieve y el relieve a su vez, influye en el proceso de formación del suelo (viceversa). El relieve también afecta al clima, pudiéndose apreciar grandes cambios en las condiciones climáticas en regiones que presentan distintas formas de relieve. Así mismo, el relieve determina también variaciones en el patrón de distribución de la vegetación.
- 3) **Clima:** los procesos de meteorización física y bioquímica están directamente relacionados con el clima local. Este clima cambia a lo largo del proceso de formación del suelo y su influencia puede apreciarse al observar un perfil de suelo. La acción del clima en los procesos básicos de formación del suelo es decisiva y tiene que ver con el aporte de agua al suelo y la temperatura. Condiciones más húmedas propician la meteorización química, elevan los niveles de materia orgánica fresca y la lixiviación de minerales y materia orgánica. La distribución natural de las plantas y el control de los procesos biológicos que tienen lugar en él, dependen de la temperatura (por ejemplo a temperaturas bajo cero no hay actividad biológica ni agua en movimiento).
- 4) **Organismos vivos:** Son considerados también formadores de suelo, desde la microfauna hasta la vegetación. Participan como fuente de materia orgánica, pero también como agentes directos de procesos de formación del suelo, ya que transforman, física, química y biológicamente el suelo. Además, contribuyen a mezclar y transportar sus materiales y descomponer la materia orgánica. Todos estos procesos están directamente relacionados con la cantidad y características de los organismos vivos. La influencia de la biota del suelo se manifiesta con claridad en características como la agregación de partículas, la estructura y porosidad.
- 5) **Factor antrópico:** Los asentamientos humanos y sus actividades socio-económicas se concentran en determinados lugares, lo cual está estrechamente relacionado con el clima y la disponibilidad de agua y de terreno fértil, que permitan que dichas actividades se lleven a cabo. La densidad de población en un lugar determinado está estrechamente relacionado con la intensificación de las actividades socioeconómicas (de la población), lo cual tiene un impacto importante sobre los suelos.
- 6) **El tiempo:** El período necesario para que el material parental evolucione es muy largo ya que el ritmo de los procesos edafogenéticos es muy lento. Este puede variar entre 0.001 mm y 1 mm de suelo/año, siendo más rápidos en climas cálidos y húmedos donde la actividad de los microorganismos es más intensa y la vegetación más abundante (Gardi *et al.* 2014).

2.2. Tipo de suelos recomendables para el cultivo del café

El café requiere de suelos con textura media (suelos francos), buena estructura (de tipo granular), de coloración oscura y alta cantidad de macro y microporos (permeabilidad moderada) (Duicela 2011; Küpper 1981), y con buen drenaje superficial, que favorezca la presencia de un ambiente oxidante (Duicela 2011; Willson 1985). Así mismo, requiere de suelos profundos (que permita la penetración de las raíces al menos hasta 80cm); en este sentido, suelos con profundidades menores a 30 cm, dificultan el desarrollo radicular (Rojas 1989). Además, requiere de suelos ligeramente ondulados; al respecto, pendientes por encima de un 40%, pueden representar fuerte riesgo hacia la erosión (Zuviría y Valenzuela 1994). También un volumen de piedras y gravas superior al 30%, reducen la capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes; por lo tanto, el porcentaje de pedregosidad recomendado debe ser menor al 30% (Mesa 1974). Los suelos buenos para café deben tener un *pH* con acidez entre 5.5 y 6.5. Valores de acidez por debajo de 5 o por encima de 6.5 dificultan la nutrición de los cafetos (Duicela 2011). Sin embargo, en la práctica se cultiva café en *pH* menor a 4 y por encima de 8. En la región tropical donde se cultiva café, a menudo los suelos son ácidos, y ricos en hierro y óxido de aluminio (ejem: andisol, inceptisol, oxisol, etc.). Estos tipos de suelo son además caracterizados por baja capacidad de intercambio catiónico (Wintgens 2004).

2.3. Requerimientos nutricionales para el café

Los elementos nutritivos que el cafeto requiere en mayor cantidad son: nitrógeno, fósforo y potasio, y en menores cantidades: calcio, magnesio, azufre, hierro, zinc, manganeso, boro y cobre. La carencia de alguno de estos nutrimentos afecta el normal crecimiento y desarrollo de las plantas (Duicela 2011). Por último, el cafeto se ve favorecido con altos contenidos de materia orgánica. Los suelos buenos para cultivar café deben tener contenidos de materia orgánica mayores al 5 %. La materia orgánica influye de manera decisiva en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo, favorece la retención de humedad y es el principal sustrato para el desarrollo de microorganismos que la transforman en una gran fuente de alimento para el cafeto. Los suelos con coloración oscura están relacionados con un mayor contenido de materia orgánica (Wintgens 2004).

2.4. Nivel de humedad del suelo necesario para el cultivo de café

El café se ve favorecido con una buena distribución de la lluvia, precipitaciones entre 1200 y 1800 mm y la existencia de un periodo seco corto. Las lluvias intensas durante todo el año son responsables de varias cosechas sucesivas y baja productividad y la falta de un periodo seco puede también limitar el cultivo del café en regiones tropicales lluviosas y bajas. Por lo tanto, un déficit hídrico mayor a 150mm anuales puede reducir el periodo productivo (Maestri y Santos-Barro 1981). La retención de humedad por el suelo está en función de sus características de textura y estructura y representa la reserva de donde las plantas absorben las cantidades necesarias para sus ciclos energéticos y de los nutrimentos (Jaramillo y Cháves 1999). Mantener altos niveles de humedad del suelo puede ser importante para el éxito del cultivo de café, sobre todo, en los primeros 30cm de suelo y especialmente en la estación seca. El desarrollo de flores y la antesis dependen de la disponibilidad de precipitaciones en la estación seca y del tiempo en que estas ocurran (Lin 2010; Cannel 1983).

2.5. Pérdidas de suelo por erosión en los cafetales

El café requiere de suelos con bajos niveles de erosión, lo cual está relacionado con la fertilidad del suelo y la cantidad de materia orgánica disponible. Terrenos escarpados en zonas tropicales pueden ser muy

susceptibles a la erosión del suelo después de la eliminación de la vegetación natural, debido a su topografía y al clima (Dadson *et al.* 2003; Anikwe *et al.* 2007; Xu *et al.* 2013). Existen dos tipos principales de erosión que pueden ocurrir en los suelos cultivados con café: La erosión hídrica laminar o por escorrentía superficial y la erosión por movimiento de masa de suelo (figura 3).

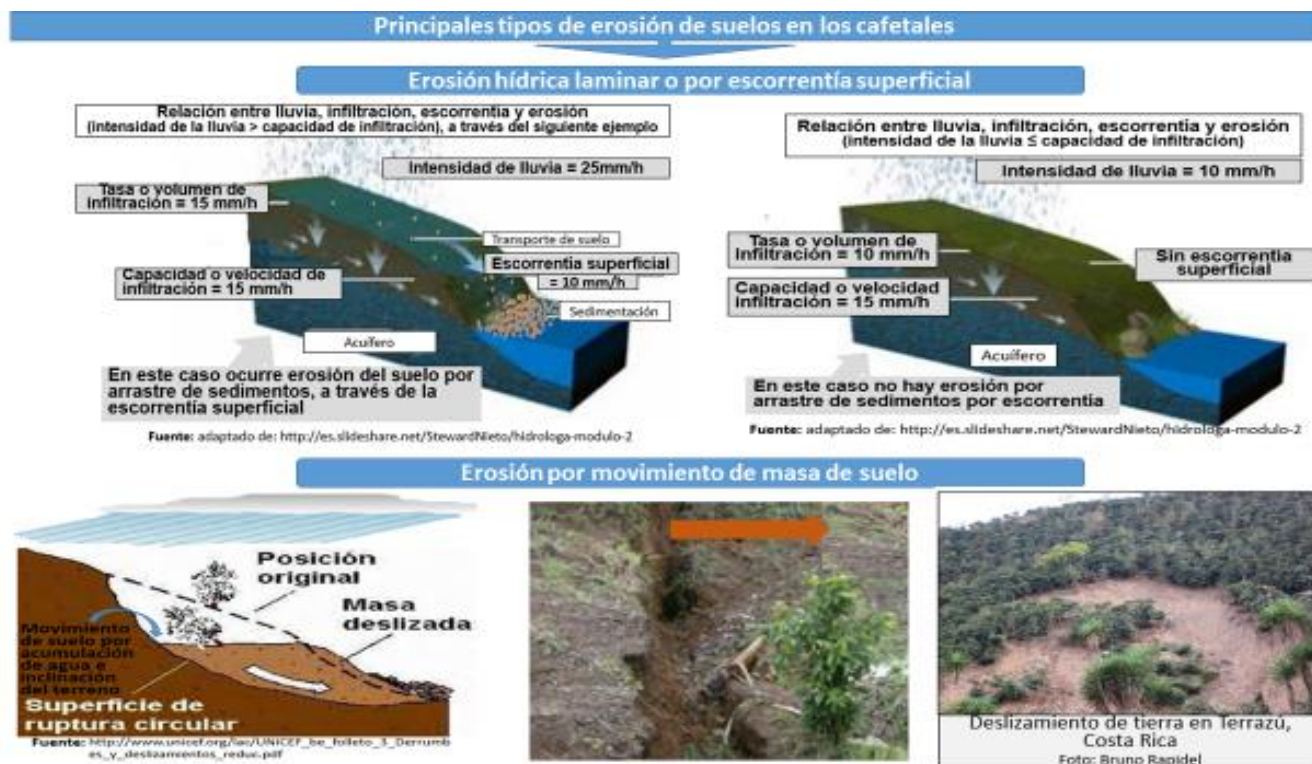


Figura 3. Esquematización de los principales tipos de erosión que pueden ocurrir en los cafetales y los principales factores que intervienen. Fuente: esquema realizado con información de diferentes fuentes, las cuales se reflejan bajo cada figura

- a) **La erosión laminar o superficial:** es la erosión causada por la escorrentía formada por lluvias abundantes. Esta escorrentía superficial depende de varios factores, entre ellos, la intensidad de la lluvia (mm/h), la tasa de infiltración o volumen de agua capaz de penetrar el suelo en un tiempo específico (mm/h) y la velocidad de infiltración (capacidad de infiltración) (mm/h), que es la velocidad máxima con que el agua penetra el suelo. Es importante considerar que en las capas inferiores del suelo, la velocidad de infiltración es inferior a las capas superiores (Villatoro-Sánchez *et al.* 2015). En este sentido, si la intensidad de lluvia es superior a la velocidad de infiltración, entonces se produce escorrentía superficial, a como se observa en el ejemplo de la figura 3. La velocidad de infiltración depende además de otros factores como: la estructura del suelo, la cobertura vegetal (Anikwe *et al.* 2007; Truman *et al.* (2005), el contenido de humedad del suelo (Wei *et al.* 2007; Villatoro-Sánchez *et al.* 2015), la pendiente del terreno (ver anexo 1a), entre otros. Aunque el efecto de la pendiente en realidad es mal conocido y complejo. Para algunos (investigadores), la pendiente favorece la escorrentía y para otros puede ser desfavorable. Por ejemplo: Ribolzi *et al.* (2011) y Patín *et al.* (2012), observaron menos escorrentía a medida que aumentaba la pendiente (pendiente > 50%, en comparación con pendientes de 30%), mientras Cheng *et al.* (2008); Yan *et al.* (2008); Shi *et al.* (2010) y Patin *et al.* (2012), observaron mayor escorrentía con el aumento de la pendiente. Por otro lado, Blanco y Aguilar (2015), observaron

mayor porcentaje de área afectada por erosión del suelo, a medida que aumentó la pendiente (ver anexo 1c).

Una vez que ocurre la escorrentía superficial puede conllevar a la erosión del suelo. Ghahramani y Ishikawa (2013) y Gomi *et al.* (2008), mencionan al respecto que la escorrentía y la pérdida de suelo están altamente correlacionados entre ellos y con la intensidad de la precipitación. Lo anterior también fue observado por Villatoro-Sánchez *et al.* (2015), quien encontró menos pérdida de suelo en el año 2012, que fue un año más seco, en comparación con el año 2011 que fue más lluvioso, comprobando que ha mayor escorrentía hay mayor pérdida de suelo (ver anexo 1a). La intensidad de erosión del suelo por la escorrentía depende también de otros factores (además de los que favorecen la escorrentía) entre ellos, la fuerza con que las partículas estén adheridas al suelo (si están poco adheridas, serán fácilmente desprendidas y llevadas por el agua), la pendiente del terreno, entre otro. Este tipo de erosión (erosión laminar) es más fácil de observar y medir (en comparación con la erosión por movimiento de masa) y ocasiona pérdidas tanto en la parcela (pérdida de fertilidad) como en los usuarios del agua, a través de la acumulación de sedimentos en embalses, represas, estanques, etc. (Gómez-Delgado *et al.* 2011).

- b) **La erosión por movimiento de masas de suelo:** este tipo de erosión, aunque puede ser ocasionada por otros fenómenos naturales, como actividad sísmica, derrumbes naturales y actividad humana; también se producen en gran medida por efecto de abundantes lluvias en el sitio. En el caso de esta última (erosión por lluvia), es provocada por agua que se acumula rápidamente en el suelo, a raíz de lluvias intensas, superando la capacidad de retención de agua del suelo, lo cual provoca el deslizamiento, favorecido por el nivel de pendiente del suelo. El suelo puede fluir a gran velocidad por una ladera o quebrada en minutos o segundos. Existen dos tipos de deslizamientos: **lento**, se puede percibir, cuando ha ocurrido repetidas veces en el mismo lugar. Se puede mirar de manera tal que frecuentemente arrastra parte de la capa vegetal (solo es un pequeño desprendimiento de tierra); **rápido**, la velocidad del movimiento es tal, que la caída de tierra puede darse en segundos. De manera general este tipo de erosión, principalmente erosión por deslizamiento rápido, es difícil de observar y sobre todo de medir sus factores, debido a que nunca se sabe con antelación, dónde ni cuándo ocurrirá. Este tipo de erosión, causa daños a infraestructuras y pone en peligro la vida humana, a parte de la fuerte destrucción que causa en la parcela y al cultivo como tal (Holt-Giménez 2002).

3. Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo dentro del cafetal

3.1. Efecto de los árboles de sombra sobre la materia orgánica del suelo: cantidad de hojarasca y ramas en el suelo.

Conservar niveles altos de materia orgánica es uno de los factores principales de los árboles de sombra (Fernández y Muschler 1999), tanto por su rol de mantener la estructura del suelo como por su importancia como fuente y sustrato de nutrientes (Guharay *et al.* 2000). El nivel de materia orgánica del suelo depende tanto de la productividad del ecosistema, como de su manejo.

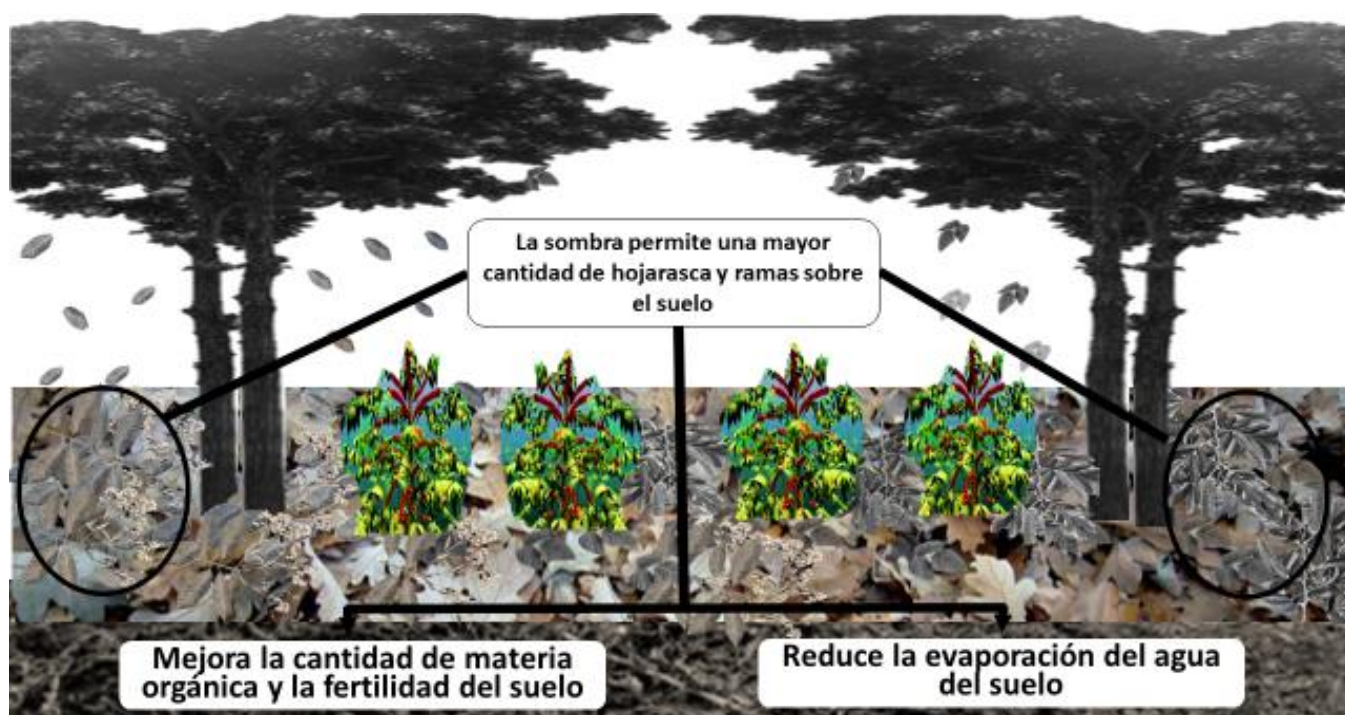


Figura 4. Efecto de la sombra sobre la erosión de los suelos. Fuente: Cabon (2015); Thériez (2015); Rapidel *et al.* (2015); Lin (2010); Guharay *et al.* (2000); Muschler (1999).

Cabon (2015) y Thériez (2015), encontraron que cafetales sombreados con *Erythrina poeppigiana* y otras especies de sombra, conservan de manera significativa una mayor cantidad de hojarasca y ramas en el suelo, en comparación con un cafetal a pleno sol (ver anexo 3). Así mismo, Muschler (1999), menciona una cantidad de 12 toneladas de hojarasca por año en cafetales sombreados versus 8 toneladas por año en cafetales sin árboles. Además, el contenido de carbono en el suelo puede aumentar, conforme aumenta el nivel de sombra, así como su capacidad de retener nutrientes (capacidad de intercambio catiónico). Es importante destacar además, que la abundante hojarasca o mantillo que proporcionan los árboles de sombra, puede ser una de las razones de que haya menos evaporación del agua del suelo bajo sombra, en comparación con pleno sol (Rapidel *et al.* 2015), lo cual fue demostrado por Lin (2010).

3.2. Efecto de los árboles de sombra sobre la humedad del suelo (balance hídrico)

El efecto de los árboles de sombra sobre el balance hídrico de las plantaciones de café es complejo, pero relativamente bien documentado. Se ha comprobado que la transpiración total de la plantación es mayor en presencia de árboles de sombra. La sombra reduce la evaporación del agua del suelo (Lin 2010), debido a la interceptación de la luz solar y a la presencia del mantillo que protege el suelo (mantillo generado por los árboles), sin embargo, la importancia de la evaporación comparada con la transpiración no ha sido correctamente evaluada aún (Rapidel *et al.* 2015). También se sabe que el mantillo producido por los árboles permite incrementar la infiltración del agua de lluvia y reducir su escorrentía (Meylan 2012; Gómez-Delgado *et al.* 2011). En general, se puede decir que los árboles de sombra transpiran más agua de la que la sombra permite ahorrar por menor transpiración del café o por menor evaporación del suelo (van Kanten y Vaast 2006). Sin embargo, puede haber una diferencia entre las profundidades de extracción del agua del suelo entre los cafetos y los árboles de sombra, lo que puede reducir la competencia por el agua en los cafetales con árboles (Cannavo *et al.* 2011).

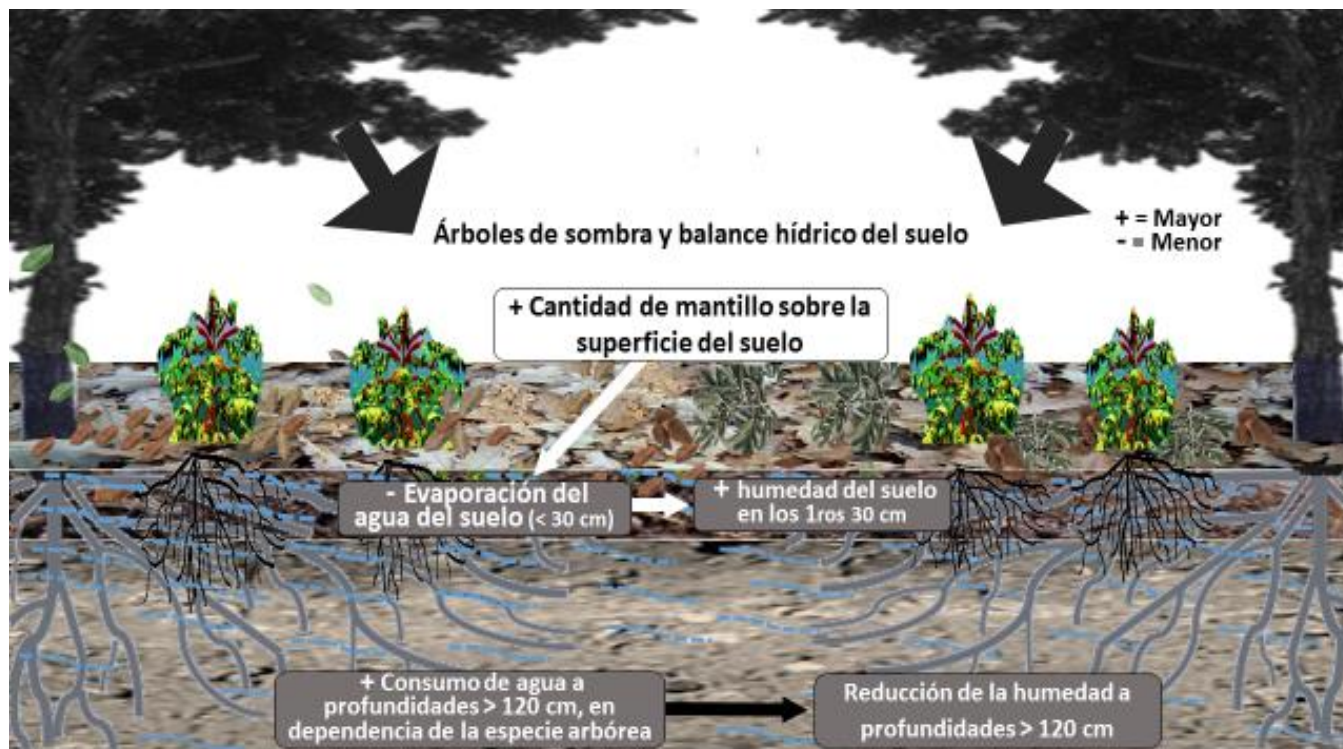


Figura 5. Efecto de la sombra sobre la erosión de los suelos. Fuente: Padovan *et al.* (2015); Rapidel *et al.* (2015); Meylan (2012); Cannavo *et al.* (2011); Gómez-Delgado *et al.* (2011); Siles *et al.* (2009); van Kanten y Vaast (2006).

Lo anterior depende en gran medida, de la especie de árboles de sombra utilizados en el sistema (Padovan *et al.* 2015). El comportamiento de la humedad del suelo en los cafetales con árboles y cafetales a pleno sol, es bastante similar hasta 120 cm de profundidad, según lo reportado por Cannavo *et al.* (2011) y Siles *et al.* (2009). Según estos autores, luego de los 120 cm y hasta los 150 cm, la disminución de la humedad fue más pronunciada en el cafetal con árboles (ver anexo 4).

3.3. Efecto de los árboles de sombra sobre la energía cinética de las gotas de lluvia y su impacto sobre el suelo

Los árboles de sombra dentro del cafetal son considerados como un beneficio por interceptar las gotas de lluvia, disminuyendo el riesgo de erosión del suelo y posiblemente la disminución de esporas de enfermedades por splashing (Verbist *et al.* 2010; Gomez-Delgado *et al.* 2011). En general, los árboles de sombra aumentan la energía cinética de las gotas de lluvia (Cabon 2015). Sin embargo, el efecto no es homogéneo; algunos árboles tienen un efecto más fuerte que otros (Thériez 2015). Por ejemplo, *Cordia alliodora* (Laurel) aumenta por 3.41 la energía cinética de las gotas a pleno sol (Thériez 2015); algo similar fue observado por Cabon (2015) (ver anexo 5). Esto, en cierta forma ya había sido mencionado por Cerdán *et al.* (2012), quienes encontraron que esa especie de árbol favorece la erosión del suelo; considerando además que, de manera general, los árboles altos causan goteo y daños a la plantación.

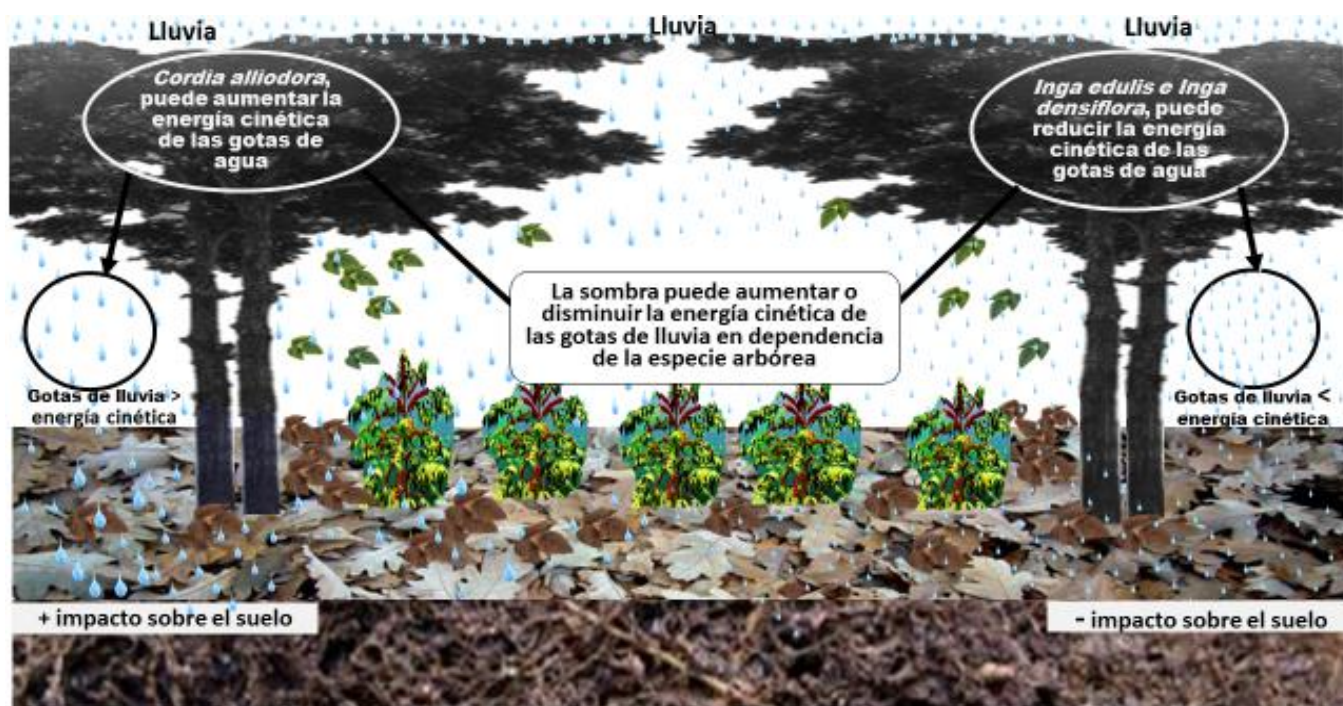


Figura 6. Efecto de la sombra sobre la erosión de los suelos. Fuente: Cabon (2015); Thériez (2015).

Otras especies de árboles como *Chloroleucon eurycyclum* (Cashá) y *Citrus spp.* (Cítricos) transmiten una lluvia similar a la que ellos reciben, es decir, que no provocan aumento ni disminución del tamaño de las gotas, a pesar de que el Cashá es un árbol alto (Thériez 2015). Finalmente, otras especies arbóreas como la *Inga edulis* y la *Inga densiflora* (especies de guabas), disminuyen la energía cinética de la lluvia (ver anexo 5). El efecto de estas especies de disminuir la energía cinética puede estar relacionado a características diferentes en cuanto a la copa, que permiten interceptar más lluvia y distribuirla a lo largo de las ramas y del tronco, lo que conlleva a su vez a disminuir el impacto sobre el suelo (Thériez 2015).

3.4. Efecto de los árboles de sombra sobre la erosión de los suelos

Según lo reportado por Villatoro-Sánchez *et al.* (2015), en un estudio realizado en Costa Rica, sobre la dinámica de la escorrentía y la pérdida de suelo en plantación de café con pendiente inclinada (suelo ultisol); el café como cultivo perenne, puede ayudar a reducir la escorrentía y los niveles de erosión de los suelos. La cobertura de suelo de manera general, la cual incluye hojas de los cafetos, hojas de los árboles de sombra (producto de poda y defoliación natural), ramas de cafetos (producto de poda y deshija) y de los árboles de sombra, y malezas; también son beneficiosos para proteger el suelo de la erosión laminar (Blanco y Aguilar 2015; Villatoro-Sánchez *et al.* 2015) (ver anexo 1b). Por lo tanto, con base en la observación de estos autores, podemos decir que los árboles de sombra son importantes para proteger el suelo de la erosión laminar y conservar su fertilidad, a través de la cantidad de materia orgánica (hojas y ramas) que estos aportan al sistema. Con respecto a la erosión por movimiento de masa de suelo (deslizamiento o deslave), se prevé que los árboles podrían contribuir a ayudar a evitarla, por tener raíces profundas que cruzan los horizontes de deslizamiento.



Figura 7. Efecto de la sombra sobre la erosión de los suelos. Fuente: Rapidel *et al.* (2015); Villatoro-Sánchez *et al.* (2015); Blanco y Aguilar (2015); Thériez (2015); Meylan *et al.* (2013); Meylan (2012); Gómez-Delgado *et al.* (2011); Verbist *et al.* (2010).

Según un estudio realizado en Nicaragua por Holt-Giménez (2002), después del fenómeno natural llamado Huracán Mitch, que ocasionó fuertes deslizamientos (pérdida de suelo), grandes daños económicos y pérdidas humanas. En este estudio se compararon fincas agroecológicas¹ y convencionales² (con diferentes cultivos), encontrando que las fincas agroecológicas tuvieron menos eventos de deslizamiento, posiblemente atribuido al uso de árboles (ver anexo 2). En fincas de café específicamente, aún no se cuenta con estudios que ayuden a explicar claramente el efecto de los árboles de sombra sobre este tipo de erosión (erosión por movimiento de masa de suelo).

Los factores que intervienen en la pérdida de suelo por erosión laminar o por escorrentía, se pueden apreciar en la ecuación sobre pérdidas de suelo, presentada por el departamento de conservación de suelos de USDA. La ecuación se denota: $A = RKLSCP$, donde, A= pérdida anual de suelo por erosión laminar y en surco, en toneladas/acre; R= factor de erosividad de las precipitaciones; K= factor de erosionabilidad del suelo; LS= factor de pendiente y longitud de la pendiente; C= factor de cobertura y manejo; P= factor de medio de medios de conducción. En esta ecuación se puede observar, el papel que juega el factor cobertura de suelo, sobre la erosión, lo cual justifica lo observado por Blanco y Aguilar (2015) y Villatoro *et al.* (2015). En resumen, con base en los estudios, podemos concluir que los árboles de sombra, de manera general, son importantes para evitar o reducir los efectos de erosión de suelo dentro del cafetal.

4. Efecto de los árboles de sombra sobre el reciclaje de nutrientes y nutrición de los cafetos

¹ Fincas que implementaban prácticas agroecológicas como: prácticas mecánicas (curvas a nivel), prácticas agronómicas (cultivos de cobertura, cultivos intercalados, rotación de cultivos (granos básicos y legumbres) y Agroforestería (árboles con cultivos).

² Prácticas mecánicas (arado, cultivar a favor de la pendiente) y prácticas agronómicas (uso de insumos químicos externos)

4.1. Ciclo de nutrientes en el cafetal (ciclo del nitrógeno)

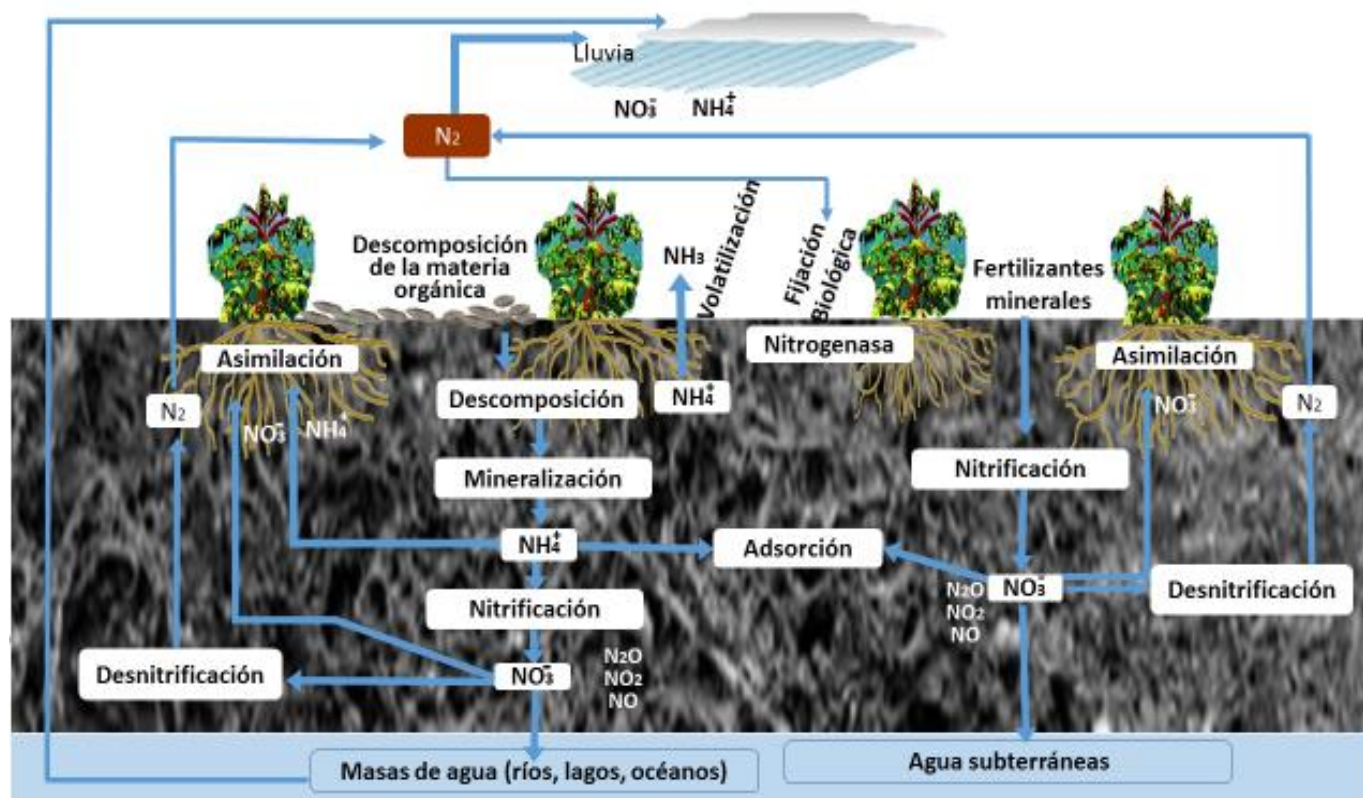


Figura 8. Ciclo del nitrógeno. Adaptado de Arana Meza (2003) y Coyne (1999)

El nitrógeno es uno de los nutrientes de mayor importancia para el cultivo del café y todas las plantas en general. Por lo tanto, es clave e indispensable comprender su ciclo, de cara a la sostenibilidad de la producción. Las únicas fuentes de nitrógeno son: la materia orgánica y el nitrógeno de la atmósfera. El nitrógeno orgánico del suelo se origina a partir de la materia orgánica y representa más del 80% del nitrógeno total del suelo, mientras el nitrógeno inorgánico representa del 2-5% del nitrógeno total del suelo (Arana Meza 2003). Para que las plantas puedan aprovechar el nitrógeno que proviene de la materia orgánica, es necesario que éste pase por un proceso llamado **mineralización**³, a través del cual es transformado en nitrógeno inorgánico en forma NH_4^+ (amonio). La otra forma de nitrógeno inorgánico, el nitrato (NO_3^-), se alcanza a partir del amonio a través del proceso de **nitrificación**⁴, realizado por diversos grupos de bacterias nitrificantes. El amonio y el nitrato, productos de esos procesos de mineralización y nitrificación, pueden ser aprovechados inmediatamente por las plantas (Arana Meza 2003). Los procesos de transformación del nitrógeno están influenciados por propiedades físico-químicas del suelo, la temperatura del suelo, la humedad, pH y la calidad y cantidad de materia orgánica (Myers *et al.* 1994; Adrianarisoa *et al.* 2009)

La forma amonio (NH_4^+) es poco móvil en el suelo y fácilmente retenido por las arcillas. Las pérdidas principales de amonio se producen por volatilización, cuando éste se transforma en amoníaco. El amonio

³ Transformación de la materia orgánica del suelo en sustancias minerales inorgánicas sencillas y solubles, con el fin de poner los nutrientes del suelo a disponibilidad de las plantas.

⁴ Formación aeróbica de nitratos a partir de la materia orgánica

también puede perderse por lixiviación, si las precipitaciones son intensas y prolongadas, aunque ese proceso queda de menor importancia. La forma nitrato (NO_3^-) por su parte, es muy soluble y móvil en la solución del suelo (no es retenido por las arcillas), razón por la cual tiende a perderse por lixiviación (lavado). Además puede perderse a través de otro proceso llamado **desnitrificación**, a través del cual el nitrógeno es convertido en óxido de nitrógeno (NO) y nitrógeno elemental (N_2), que luego se pierde por volatilización. El nitrato que se pierde por lixiviación puede llegar hasta las aguas subterráneas. Desde las aguas el N regresa a la atmósfera y posteriormente al suelo, a través de la lluvia, para continuar su ciclo nuevamente (Arana Meza 2003).

N_2 en la atmósfera es, por lejos, la mayor reserva de nitrógeno en la tierra. La Fijación de nitrógeno (conversión de N_2 en formas asimilables por plantas), puede ocurrir de manera abiótica a partir de reacciones de fenómenos naturales (descargas eléctricas) o procesos de combustión, los cuales son arrastrados por el agua de lluvia hasta el suelo. Sin embargo, noventa por ciento de la fijación es por la acción de microorganismos. Aquella fijación biológica es llevada a cabo por bacterias de vida libre o por simbiosis con algunas especies vegetales. Más conocidas son las plantas leguminosas, las cuales poseen en sus raíces nódulos con bacterias simbióticas conocidas como *Rhizobium*. Estas bacterias producen compuestos nitrogenados que favorecen el crecimiento de la planta (Wintgens 2004)

El uso de fertilizantes aumenta la cantidad de nitrógeno utilizable en el suelo, el cual es aplicado a través de diferentes fórmulas de abono: fórmula completa (N, P, K) y urea (nitrógeno al 46%). Una parte de este nitrógeno aplicado al suelo de manera adicional es utilizado por las plantas, una vez convertido en nitrato a través del proceso de nitrificación. Mientras otra parte (sobre todo cuando se aplica N en exceso) se filtra en el suelo y contamina las fuentes de agua subterránea (a como se observa en la figura) (Coyne 1999).

4.2. Árboles de sombra y reciclaje de nutrientes del suelo dentro del cafetal

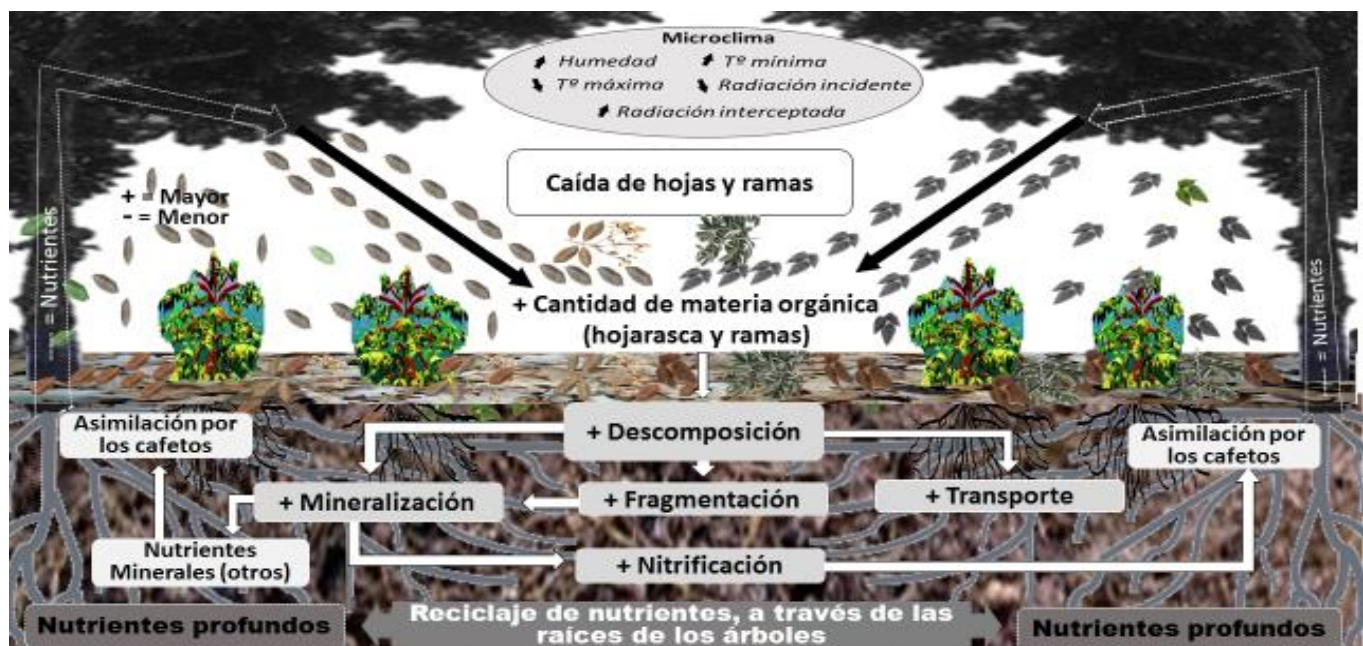


Figura 9. Efecto de la sombra sobre la erosión de los suelos. Fuente: Rapidel et al. (2015); Cabon (2015); Thériéz (2015); Baraër (2013); Tully et al. (2013); Tully et al. (2012); Nygren et al. (2012); Harmand et al. (2010); Leblanc et al. (2007); Muschler (1999); Palm (1995).

Entre los servicios ecosistémicos de la incorporación de árboles en el cafetal, el reciclaje de nutrientes tiene un papel central. Este beneficio de los árboles puede favorecer a los sistemas agroforestales sobre otros sistemas de uso de la tierra, siempre y cuando las interacciones positivas sean más fuertes que las interacciones negativas (por ej. competencia por nutrientes y por agua) (Muschler 1999). Es conocido que los cafetales con árboles de sombra aportan mayor cantidad de materia orgánica al suelo, lo cual fue demostrado por Cabon (2015) y Thériez (2015) (explicado en el capítulo sobre materia orgánica).

Partiendo de lo anterior, interesa conocer además, el efecto de los árboles sobre la disponibilidad de los nutrientes para los cafetos, a partir de esa cantidad de materia orgánica aportada por los árboles, en comparación con cafetales sin árboles. Al respecto Baraër (2013) realizó un estudio enfocado en determinar el efecto de los árboles de sombra sobre los procesos de mineralización y nitrificación de la materia orgánica del suelo, lo cual se explica en el párrafo que sigue.

4.3. La calidad y cantidad de materia orgánica afectan el proceso de mineralización y nitrificación

Baraër (2013), a través de su estudio realizado sobre: Determinantes del ciclo del nitrógeno en sistemas agroforestales con café en Costa Rica (diferentes niveles y especies de sombra⁵), encontró una fuerte relación entre la mineralización y el tipo de sombra. En el estudio se analizó la mineralización aeróbica y anaeróbica (en laboratorio), a partir de muestras de suelo tomadas de diferentes tratamientos. Con respecto a la mineralización anaeróbica, se observó que suelos bajo café a pleno sol obtuvieron la tasa más lenta (1.7mg N/kg de suelo) de todos los tratamientos, y al contrario suelos bajo café y *Erythrina poeppigiana*, árbol fijador de nitrógeno, presentaron la tasa más rápida de mineralización (5.64mg N/kg de suelo). La mineralización aeróbica fue igualmente superior bajo los árboles de sombra, en comparación con el tratamiento a pleno sol. Las especies leguminosas fijadoras de nitrógeno (*Erythrina poeppigiana*, *Chloroleucon eurycyclum*), brindaron los datos más altos al respecto. La relación entre la mineralización aeróbica y nitrificación inclusive, fue muy cerca de 1 (muy fuerte), logrando observar además, una correlación entre la mineralización aeróbica y el nitrógeno mineral del suelo, es decir, que casi todo el amonio (NH_4^+) (100%) se convierte en nitrato (NO_3). El resultado de este estudio da la noción de que en la práctica el proceso de nitrificación puede ser muy eficiente (cerca del 90%) y además, que las concentraciones de nitrógeno son un buen indicador de las tasa de mineralización (ver anexo 6). Resumiendo lo anterior, con base al estudio de Baraër (2013), podemos decir que hay mayor mineralización bajo árboles de sombra, variable según la especie, siendo mayor bajo sombra de árboles leguminosas.

4.4. Árboles fijadores de nitrógeno: el árbol al servicio del cultivo

El uso de árboles de servicio es una práctica muy usual en plantaciones de café moderadamente intensivas de América Latina. La diversidad específica en estos sistemas es reducida a dos o tres especies, incluyendo café. Las especies de sombra más frecuentes son *Erythrina spp.* (*poeppigiana*, *fusca*,

⁵ Tratamientos con manejo medio convencional (MC) y bajo orgánico (BO) con sombra media de las especies: Cashá (CMC y CBO), *Erythrina* o poró (EMC y EBO), *Terminalia* (TMC) y tratamiento de café sin sombra con manejo medio convencional (SMC).

berteroana), *Inga spp.* (*oerstediana*, *edulis*, *punctata*, *laurina*, *vera*, *jinicuil*, *densiflora*), y en menor grado, *Gliricidia sepium* y *Grevillea robusta*. Son especies que por lo general fijan nitrógeno (mimosoideae o faboideae, con la excepción de *G. robusta*), tienen crecimiento muy rápido y resisten podas una o varias veces al año. Algunas producen leña de calidad buena o regular, otras producen frutas (*Inga edulis*, por ejemplo), y otras no producen ni leña ni frutas comestibles (*Erythrina poeppigiana*, por ejemplo). Se multiplican fácilmente, con estacas (*Erythrina spp.*) o semillas (*Inga spp.*) (Rapidel *et al.* 2015). La presencia de especies fijadoras de nitrógeno atmosférico en el sistema agroforestal permite mejorar el balance en este elemento. Las cantidades estimadas de nitrógeno, en cafetales bajo condiciones normales, con manejo de especies fijadoras como *Erythrina poeppigiana* o *Inga edulis*, rodean los 100 kg ha⁻¹ (Leblanc *et al.* 2007), lo que puede variar desde 56-555 kg ha⁻¹ (Nygren *et al.* 2012).

Los servicios que aportan los árboles son principalmente dirigidos a la producción de café: protección del café de las grandes variaciones de temperatura, fertilizante nitrogenado por los residuos de podas y por la descomposición de los nódulos de las raíces después de la poda (Nygren y Ramírez 1995), mejoramiento de la estructura superficial del suelo y disminución de escorrentía de las aguas de lluvia (Meylan 2012), y disminución de la erosión. También se ha mencionado que la presencia de estos árboles permite disminuir la oscilación bienal de los rendimientos, e incrementar la duración de vida de los cafetales (DaMatta 2004). La producción de café depende en gran medida de los aportes de nitrógeno, que representan un gasto muy importante en las plantaciones de café (Meylan *et al.* 2013). Se ha manejado el concepto de que la presencia de árboles de servicio le confiere al sistema una mayor resiliencia ecológica y económica. En la parte ecológica, actuando como “buffer” de los cambios en el ambiente, por ejemplo, la última crisis de la roya mostró tendencia hacia una mayor resiliencia ecológica en los cafetales bajo sombra (Avelino *et al.* 2015). Mientras en la parte económica, colaborando con una menor dependencia a las variaciones de los precios, tanto de café como de insumos (fertilizantes sintéticos) (Herzog 1994).

4.5. Efecto de los árboles de sombra sobre el balance de nutrientes

En el caso de cafetales con árboles de sombra leguminosa, el balance de nutrientes se ve favorecido por esas especies, específicamente para el caso del nitrógeno. Sin embargo para los demás elementos minerales o en el caso de nitrógeno para especies de sombra no fijadoras de nitrógeno, el balance resulta de dos procesos contradictorios: 1) la competencia por los elementos (minerales) entre las especies de sombra que los extraen y el café; 2) el reciclaje de los elementos por medio de la producción de mantillo y residuos por los árboles, cuando la presencia de estos permite aumentar la eficiencia global de uso de estos elementos. El balance depende de muchos factores, tales como las características de las especies de sombra y la sincronía entre la descomposición de su mantillo con la absorción del cafeto, el clima, y particularmente el volumen de agua de lluvia que drena fuera del alcance de las raíces del cafeto, o de los elementos considerados (Rapidel *et al.* 2015).

Los árboles de sombra de manera general, pueden ayudar también a evitar las pérdidas de nutrientes. Al respecto, Tully *et al.* (2012), (2013) han estudiado el efecto de la cantidad de árboles sobre la pérdida (lixiviación) de nitrógeno; así mismo, han estudiado el efecto de la composición arbórea sobre la lixiviación y concentración de nitrógeno en el suelo, respectivamente (Ver anexo 7). En este sentido, Tully *et al.* (2012) encontraron que a medida que aumenta la biomasa en el suelo (por mayor cantidad de

árboles), hay menos pérdida de Nitrógeno y fósforo en el suelo. Así mismo, Tully *et al.* (2013) mencionan que tanto el uso de fertilizantes orgánicos como la incorporación de árboles en las fincas pueden reducir las pérdidas de nutrientes en comparación con fincas manejadas de manera convencional (monocultivo). Estos autores encontraron mayores concentraciones de Nitrato (NO_3) y fosfato (PO_4) en lixiviados obtenidos de suelos de cafetales sin árboles de sombra, que en café cultivado en sistemas agroforestales (orgánicos y convencionales) (ver anexo 7).

4.6. Un sistema radicular profundo favorece el reciclaje de nutrientes

Harmand *et al.* (2010) encontraron una buena cantidad de nitrato (hasta 1570 kg por hectárea) acumulado en el subsuelo bajo café a profundidad entre 80-200cm, y con lixiviaciones aún a profundidades mayores (hasta 380cm). Según estos autores, el nitrato acumulado en el subsuelo podría ser aprovechado en sistema agroforestal (a través de árboles con raíces profundas) y podría ponerse a disponibilidad del cultivo a través de la materia orgánica que los árboles regresan al suelo (ver figura 9). Este efecto también había sido mencionado anteriormente por otros autores, quienes mencionaban que los árboles de sombra pueden ofrecer la posibilidad de reciclar tanto nutrimentos que están profundos, fuera del alcance del cultivo, como de aprovecharlos de manera superficial evitando su lixiviación (Lundgren 1979; Cannell *et al.* 1996). Por otro lado, se estima que el reciclaje del fósforo por los árboles de sombra es bajo (Palm 1995), por lo que con referencia a este elemento podría haber fenómenos de competencia más que de facilitación entre especies.

5. Efecto de los árboles de sombra sobre la fenología y fisiología del café

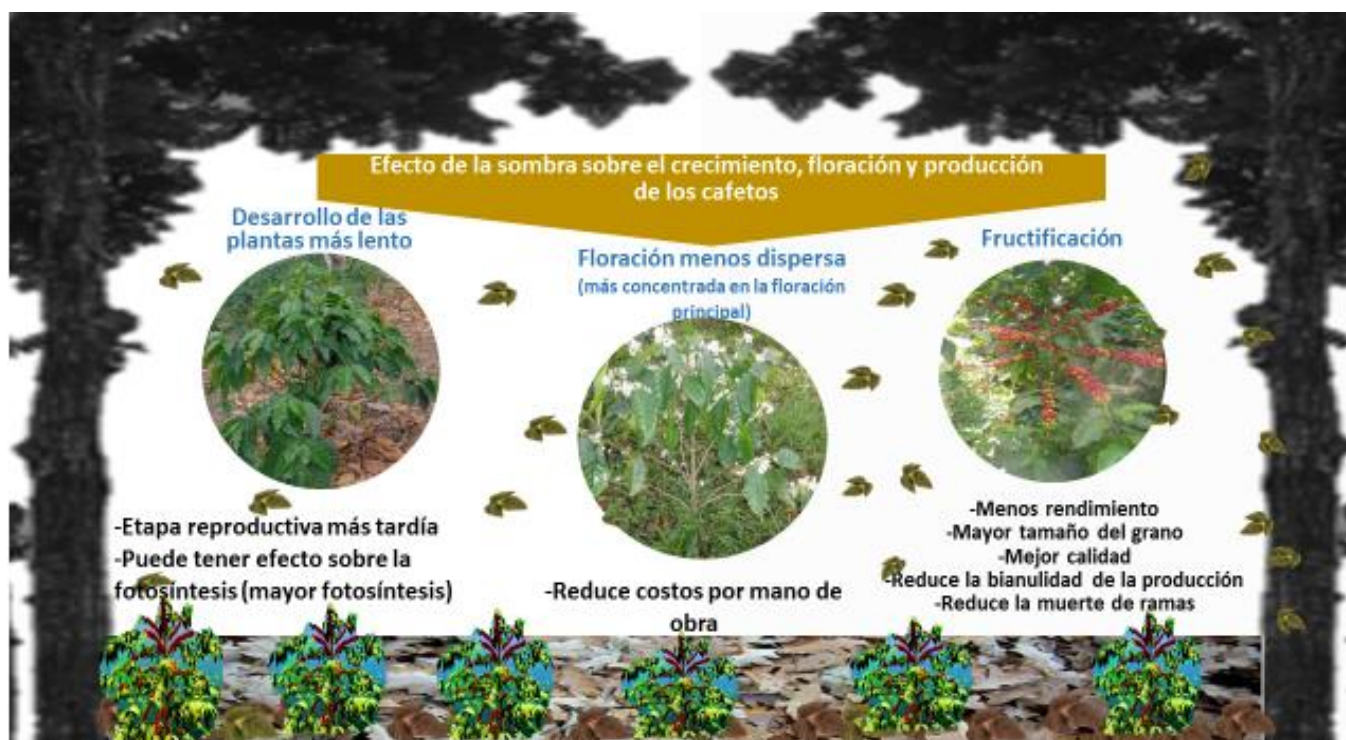


Figura 10. Efecto la sombra sobre la fisiología y fenología del cafetal. Figura realizada con información de las fuentes: Theriez (2015); López *et al.* (2012); IICA (1988); Lin (2010); Siles *et al.* (2009); Chaves *et al.* (2008); DaMatta (2004); Fassbender (1987); Vis (1986); Lundgren (1979); Boyer (1968). **Fotos:** Rogelio Villarreyna

5.1. Efecto de los árboles de sombra sobre el crecimiento de los cafetos

La sombra puede provocar cambios en la morfología foliar, como el aumento del área individual de las hojas, reducción del espesor de las hojas, menor número de estomas por cm^2 , la relación parte aérea/raíz tiende a ser mayor, reducción en el área basal de las plantas y por último, la velocidad a la que las hojas se renuevan tiende a ser menor en comparación con pleno sol (López-Bravo *et al.* 2012; Siles *et al.* 2010; Estivariz 1997). Los cafetales bajo sombra mantienen sus hojas durante el verano y comienzan el proceso de revestimiento con el inicio de las lluvias, mientras que los cafetales a pleno sol, pierden rápidamente sus hojas en el verano y comienzan el proceso de revestimiento aún antes de las lluvias (Guharay *et al.* 2000). También es sabido que hojas de café que reciben sol directo muestran una tasa de fotosíntesis menor que las hojas bajo sombra. Esto se puede explicar quizá porque las hojas de café están sujetas a foto-inhibición y a foto-respiración en condiciones de alta radiación, lo cual no permite fotosíntesis e incluso puede provocar daños permanentes en el aparato fotosintético (Chaves *et al.* 2008). La tasa de fotosíntesis de las hojas de café es relativamente baja (máximo alrededor de $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la cual puede estar relacionada con una baja conductancia estomática de las hojas (DaMatta 2004). Las radiaciones saturantes varían entre 300 y 700 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ según las condiciones climáticas en particular. Sin embargo, una limitante a lo anterior es que se ha encontrado casi siempre que la fotosíntesis no se reduce en condiciones de sombra menores al 55 % (Franck y Vaast 2009).

5.2. Efecto de los árboles de sombra sobre la floración

La sombra evita la quema directa por luz solar de los botones florales y al evitar este efecto puede aumentar el cuaje de los mismos (IICA 1988). Lo anterior explica que Estivariz (1997), haya encontrado una mayor eficiencia de conversión de flor a fruto (1.6^6), en café con mayor porcentaje de sombra de *Erythrina sp.* (40-60%), versus 1.8^7 para café con menos de 20% de sombra de la misma especie. Sin embargo, bajo sol es mayor el número de flores que brotan, en comparación con el sistema sombreado (IICA 1988). En este sentido, realizar podas de sombra hasta el inicio de las lluvias (Mayo, Junio), es favorable para conservar la floración (mayor cuaje) e incrementar la producción, en vez de realizarla en los meses de enero y febrero, cuando la planta quedaría expuesta a fuerte estrés por el sol, en los meses más calientes y secos (Guerra 1976). Por otro lado, la sombra ayuda a evitar floraciones dispersas, es decir, que puede atrasar las floraciones³ y concentrarlas en un mayor porcentaje en la floración principal, mientras que a pleno sol puede haber tendencia a adelantarse la floración (Angrand *et al.* 2004) (Ver anexo 12).

5.3. Efecto de la sombra sobre la producción

En comparación con el cafeto a pleno sol, se reporta un desarrollo más lento del grano bajo sombra, con una maduración más tardía, pero más pareja y mayor tamaño del grano (IICA 1988; Guyot *et al.* 1996). Con respecto al tamaño del fruto Guyot *et al.* (1996), analizó muestras de café en grano oro, extraídas de cafetales sombreados y cafetales a pleno sol. Para tal caso se utilizaron diferentes medidas de tamices: 12, 14, 16 y 18 x 1/64 pulgadas. En este sentido, el rechazo acumulado de granos sobre los tamices 16 y 18, fue de 69 % sobre las muestras de café de sombra contra el 65 % sobre las muestras de cafetales sin sombra. Este resultado muestra que la sombra favorece, aunque levemente, una mejor granulometría.

⁶ Por cada 16 flores, 10 se convirtieron en fruto

⁷ Por cada 18 flores, 10 se convirtieron en fruto

Los estudios también demuestran un claro efecto de la sombra sobre la reducción de la carga fructífera (DaMatta y Rodríguez 2007; Avelino y Rivas 2013).

Estivariz (1997) encontró que la producción potencial de frutos por cafeto, fue un 41% más baja en sombra (*Erythrina sp.*) con porcentaje de 40-60% (1091 frutos por planta), que en sombra con porcentaje menor al 20% (1838 frutos). Algo parecido encontró Siles *et al.* (2010), con reducciones del rendimiento bajo sombra (*Inga sp.*) de 38%. Al respecto, Baraër (2013) en un estudio realizado en Turrialba-Costa Rica, analizó el contenido de nitrógeno en plantas de café con diferentes especies y niveles de sombra y pleno sol, y su relación con el rendimiento. Este autor encontró mayor contenido de nitrógeno en las plantas a pleno sol, lo que a su vez se relacionó fuertemente con un mejor rendimiento de las plantas a pleno sol (ver anexo 8). Sin embargo, bajo sombra se obtienen mayores porcentajes de frutos de buen tamaño y calidad para la exportación, además de frutos más sanos, libres de daños por quemaduras sol (Guyot 1996)). Según Guyot *et al.* (1996), la sombra incrementa el contenido de ácidos clorogénicos (+ 10 %), la acidez estimada por el pH, la acidez total (+ 16 %), los contenidos de cafeína (+ 4 %) y de sacarosa (+ 3 %), en comparación con pleno sol. Por otro lado, la sombra disminuye el contenido de trigonelina (- 10 %); mientras que los contenidos de grasa permanecen constantes. Se encontró además, una buena relación entre la granulometría y los aspectos químicos analizados (ver anexo 9). En este sentido, la sombra al favorecer una mejor granulometría, aumenta por lo tanto la sacarosa y la acidez, favoreciendo de esta manera la calidad final del producto, puesto que estos constituyentes son precursores del aroma e intervienen activamente en las reacciones de Maillard⁸ durante la torrefacción (tueste hasta obtener un producto torrefacto⁹) del café.

Otro aspecto importante de mencionar es que la sombra desfavorece la bianualidad de la producción, en comparación con cafetales a pleno sol, así mismo, bajo sombra hay una disminución de muerte de ramas de los cafetos (muerte regresiva) en comparación con café a pleno sol (DaMatta 2004). Por otro lado, los cafetales arbolados, permiten una producción más sostenible, menos dependiente de insumos externos, por el aporte de materia orgánica al sistema, el cual mejora la fertilidad de los suelos (Herzog 1994). Así mismo, el efecto de la sombra de regular la carga fructífera, reduce casi totalmente la antracnosis del café, lo que significa una reducción en costos por compra de fungicidas (Rapidel *et al.* 2015).

6. Efecto de la sombra sobre la biología del suelo

La diversidad de organismos en el suelo o productos microbianos son parte de las propiedades dinámicas que definen la salud y calidad del suelo, a parte de la cantidad de materia orgánica que éste (el suelo) contiene (Romig *et al.* 1995). En este sentido, la microbiología del suelo se enfoca en explicar y entender esa diversidad de organismos que habitan en el suelo y los clasifica para tal fin en: macrofauna, mesofauna y microfauna. La macrofauna, contribuye en la depredación de microbios, afecta la estructura del suelo y contribuye en la descomposición de la materia orgánica, al igual que la mesofauna y microfauna. En este sentido, las lombrices de tierra (macrofauna), por ejemplo, afectan en gran medida la estructura física del suelo: fomentan el crecimiento de las raíces, la ventilación del suelo y la remoción de la materia orgánica (Coyne (1999).

⁸ Conjunto complejo de reacciones químicas que traen consigo la producción de melanoidinas coloreadas que van desde el amarillo claro hasta el café muy oscuro e incluso negro.

⁹ Es el café que se obtiene tras someter el grano a un proceso especial de tostadura, en la cual se añade una cantidad limitada de azúcar (15% máximo)

Los cafetales arbolados resultan ser beneficiosos para las lombrices del suelo, lo cual puede ser variable en dependencia de las especies de sombra utilizadas. Al respecto, Porras Vanegas (2006), en un estudio realizado en Turrialba-Jiménez, Costa Rica, con diferentes especies y niveles de sombra incluyendo cafetales a pleno sol, bajo manejo convencional y orgánico, encontró mayor cantidad de lombrices en los cafetales con árboles de sombra, en comparación con los cafetales sin sombra (ver anexo 10). Los cafetales con sombra de *Erythrina poeppigiana* (poró), bajo manejo orgánico reportaron la mayor cantidad de lombrices. Un resultado similar había sido reportado por Sánchez *et al.* (2005), quienes encontraron también mayor número de lombrices en café con sombra y manejo orgánico (265 ind/m²), versus cafetales con manejo convencional (131 ind/m²), en un estudio realizado también en Turrialba-Costa Rica. El resultado encontrado por estos autores, puede estar relacionado con la menor evaporación del agua en los sistemas agroforestales. En el mismo estudio realizado por Porras Vanegas (2006), se encontró a demás mayor número de actinomicetos¹⁰ en las parcelas de bajo café con sombra en comparación con parcelas con café a pleno sol (ver anexo 11), lo que da una clara idea de la importancia de la sombra para estos organismos del suelo. Así mismo, es el estudio no se encontró diferencias significativas en cuanto al número de hongos en el suelo, en los sistemas de café (sombra y pleno sol). Sin embargo, Staver *et al.* (2001) mencionan que la luz solar directa en los cafetales reduce las poblaciones de *Beauveria bassiana* y *Lecanicilium lecanii*, hongos que se desarrollan de manera natural en el suelo y son que son utilizados para el control de plagas y enfermedades como, *Hypothenemus hampei* (broca del café) y *Hemileia vastatrix*, respectivamente (roya del café).

7. Conclusión

A través de la revisión de diferentes estudios, orientados a aclarar el efecto de la sombra sobre el suelo, podemos decir que el uso de árboles de sombra en los cafetales es más beneficiosa que perjudicial, por las siguientes razones:

1. Los árboles de sombra incrementan el contenido de materia orgánica en el suelo, a través de la hojarasca y ramas que aportan al sistema, ya sea de manera natural o a través del manejo de los árboles, mediante la poda realizada.
2. Los árboles de sombra contribuyen a evitar la erosión laminar de los suelos dentro del cafetal, lo cual se explica por la cantidad de mantillo que depositan sobre el suelo. Posiblemente, los árboles de sombra en el cafetal, contribuyan a disminuir los riesgos de erosión por movimiento de masa, lo cual necesita de estudios que ayuden a consolidar esta hipótesis.
3. Los árboles de sombra contribuyen de manera muy positiva al reciclaje de nutrientes del suelo. Favorecen los procesos de mineralización y nitrificación, así mismo, pueden ayudar a poner a disponibilidad de las plantas, nutrientes que se encuentran profundos, fuera del alcance de los cafetos. Por otro lado, los árboles de sombra ayudan a evitar las pérdidas de nutrientes por lixiviación, dentro del sistema. A medida que aumenta la biomasa en el sistema pueden haber menores pérdidas, sobre todo de Nitrógeno y fosforo.
4. En los cafetales arbolados hay mayor consumo de agua del suelo, en comparación con cafetales sin sombra, sobre todo a profundidades mayores a 120 cm, debido al consumo de agua por los árboles. Sin

¹⁰ Clase de bacterias Gram positivo. La mayoría de ellas se encuentran en la tierra y juegan un rol importante en la descomposición de la materia orgánica, tales como la celulosa y la quitina; además renuevan las reservas de nutrientes en el suelo y son fundamentales en la formación de humus.

embargo, en los cafetales con sombra hay menos evaporación de agua, lo cual se atribuye a la presencia del mantillo, que protege al suelo de tal efecto.

5. La sombra es favorable para muchos organismos que habitan en el suelo y que son importantes para los procesos de descomposición de la materia orgánica. Entre estos organismos se destacan, las lombrices de tierra, algunas bacterias y hongos del suelo, los cuales se ven favorecidos por la humedad que se conserva por mayor tiempo, en los primeros centímetros de suelo.
6. Algunas especies de árboles pueden aumentar la energía cinética de las gotas de lluvia y causar cierto efecto sobre el suelo (problemas de erosión); sin embargo, esto puede contrarrestarse haciendo una mejor selección de los árboles a utilizar dentro del sistema. Leguminosas como guabas y poró, por ejemplo, siguen presentando una buena opción al respecto, debido a que tienen copa abundante, producen cantidades importantes de hojarasca y reducen o conservan la energía cinética de las gotas de lluvia, limitando así la erosión del suelo.
7. Los árboles de sombra reducen la carga fructífera de los cafetos, provocando bajas en el rendimiento por unidad de superficie, pero por otro lado, mejoran la calidad del café que se produce y puede reducir el fenómeno de bienalidad de la producción y ayuda a amortiguar los daños severos de enfermedades como la roya y la antracnosis, ante ataques severos.
8. El aporte de nutrientes que los árboles de sombra aportan al sistema, sobre todo los árboles de servicio (leguminosas), contribuye a la sostenibilidad de la producción, debido a la menor demanda de fertilizantes sintéticos, en comparación con los cafetales a pleno sol. Esto es muy importante de cara a la reducción de costos en la producción, sobre todo considerando los altos costos de los fertilizantes sintéticos.

8. Agradecimientos

“This project is part of the International Climate Initiative (ICI). German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) supports this initiative on the basis of a decision adopted by the German Bundestag.”

9. Literatura citada

- Andrianarisoa, K.S.; Zeller B.; Dupouey, J.L.; Dambrine, E. 2000. Comparing indicators of N status of 50 beech stands (*Fagus sylvatica* L.) in northeastern France, *Forest Ecology and Management*, 257:2241–2253.
- Angrand, J.; Vaast, P.; Beer, J.; Benjamin, T. 2004. Comportamiento vegetativo y productivo de *Coffea arabica* a pleno sol y en tres sistemas agroforestales en condiciones subóptimas en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*: 41-42.
- Anikwe, M.A.; Ngwu, O.E.; Mbach, C.N.; Ude, E.E. 2007. Effect of ground cover by different crops on soil loss and physicochemical properties of an Ultisol in South Eastern Nigeria. *Nigerian J. Soil Sci.* 17:94–97.
- Arana Meza, V.H. 2003. Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (*Coffea arabica* L.) asociado con Poró [*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook], Tesis MagSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 118 p.
- Ash, N.; Bennett, K.; Reid, W.; Irwin, F.; Ranganathan, J.; Scholes, R.; Tomich, T.P.; Brown, C.; Gitay, H.; Raudsepp-Hearne, C.; Lee, M. 2010: “Assessing Ecosystems, Ecosystem Services and Human Well-being”: Ecosystems and Human well-being a manual for assessment practitioners. EarthScan, Londres, p. 1-32
- Avelino, J.; Rivas, G. 2013. La roya anaranjada del cafeto <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.
- Avelino, J.; Cristancho, M.; Georgiou, S.; Imbach, P.; Aguilar, L.; Bornemann, G.; Läderach, P.; Anzueto, F.; Hruska, A.; Morales, C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts: plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* 7, 303–321.
- Baraër, T. 2013. Déterminants du cycle de l’azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. Mémoire de fin d’études d’ingénieur, CIRAD/CATIE. 36 p.
- Blanco Sepúlveda, R.; Aguilar Carrillo, A. 2015. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga* spp and *Musa* spp) in Northern Nicaragua. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 210:25-35.
- Bouroncle, C.; Imbach, P.; Laderach, P.; Rodríguez, B.; Medellín, C.; Fung, E. 2014. La agricultura de Nicaragua y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? CCAFS/CGIAR. 8 p.
- Cabon, M. 2015. Effect of shade on microclimate, soil fertility and productivity of coffee trees in Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Report Internship job. CIRAD-CATIE. 31 p.
- Cannavo, P.; Sansoulet, J.; Harmand, J.M.; Siles, P.; Dreyer, E.; Vaast, P. 2011. Agroforestry associating coffee and *Inga* densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140(1-2):1-13.
- Cannell, M.G.R., 1983. *Coffee Biologist* 30, 257–263.
- Cannell, M.G.R.; Van Noordwijk, M.; Ong, C.K. 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agrofor Syst* 34:27–31.
- CEPAL (Comisión Economía para América Latina y el Caribe). 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. Publicación de las Naciones Unidas. 162 p.
- Cerdán, C. R., Rebolledo, M. C., Soto, G., Rapidel, B., & Sinclair, F. L. (2012). Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*, 110, 119-130.
- Chaves, RM; Ten-Caten, A; Pinheiro, HA; Ribeiro, ACF; DaMatta, FM. 2008. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees* 22:351-361.

- Cheng, Q.; Ma, W.; Cai, Q. 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China. *GeoJournal* 71 (2), 117–125.
- Coyne, M. 1999. *Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio*. Editorial Paraninfo, Madrid, España. 416p.
- Dadson, S.J.; Hovius, N.; Chen, H.; Dade, W.B.; Hsieh, M.L.; Willett, S.D.; Hu, J.C.; Horng, M.J.; Chen, M.C.; Stark, C.P.; Lague, D.; Lin, J.C.; 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature* 426 (6967), 648–651.
- DaMatta, F.M., 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86:99-114.
- DaMatta, F.; Rodriguez, N. 2007. Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana* 25(1): 113-123.
- Duicela Guambi, L.A. 2011. Manejo sostenible de fincas cafetaleras: Buenas prácticas en la producción de café arábico y gestión de la calidad en las organizaciones de productores. Porto Viejo, Ecuador, Imprenta CGRAF, Manta. COFENAC (Consejo Cafetalero Nacional). 309 p.
- Estivariz, C.J. 1997. Efecto de sombra sobre floración y producción de *Coffea arabica* var. Caturra, después de una poda completa en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE. CR.
- Franck, N; Vaast, P. 2009. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. *Tree Physiology* 23:761–769.
- Ghini, R.; Hamada, E.; Pedro Júnior, M.J.; Marengo, J.A.; Ribeiro do Valle Gonçalves, R. 2008. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. *Pesquisa agropecuária Brasileira* 43(2): 187-194.
- Gardi, C.; Angelini, M.; Barceló, S.; Comerma, J.; Cruz Gaistardo, C.; Encina Rojas, A.; Jones, A.; Krasilnikov, P.; Mendonça Santos Brefin, M.L.; Montanarella, L.; Muniz Ugarte, O.; Schad, P.; Vara Rodríguez, M.I.; Vargas, R. (eds). 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp.
- Ghahramani, A.; Ishikawa, Y. 2013. Water flux and sediment transport within a forestall landscape: the role of connectivity, subsurface flow, and slope length scale on transport mechanism. *Hydrol. Process.* 27:4091–4102.
- Gómez-Delgado, F.; Rouspard, O.; le Maire, G.; Taugourdeau, S.; Pérez, A.; van Oijen, M.; Vaast, P.; Rapidel, B.; Harmand, J.M.; Voltz, M.; Bonnefond, J.M.; Imbach, P.; Moussa, R. 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:369-392.
- Gomi, T.R.; Sidle, R.C.; Miyata, S.; Kosugi, K.; Onda, Y. 2008. Dynamics runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: scale effects and runoff transfer. *Water Resour. Res.* 44:1–16.
- Guerra Díaz, A. 1976. Tipo de sombras más comunes. *In* manual técnico del cultivo del café en El Salvador. Santa Tecla, El Salvador, Instituto Salvadoreño de investigación del café: 79-86.
- Guyot, B.; Gueule, D.; Manez, J.C.; Perriot, J.J.; Giron, J.; Villain, L. 1996. Influence de l'altitude et de l'ombrage sur la qualité des cafés Arabica. *Qualite*, 273-283.
- Harmand, J.M.; Ávila, H.; Oliver, R.; Saint-André, L. Dambrine, E. 2010. The impact of kaolinite and oxi-hydroxides on nitrate adsorption in deep layers of a Costarican Acrisol under coffee cultivation. *Geoderma* 158:216-224.
- Herzog, F. 1994. Multipurpose shade trees in coffee and cocoa plantations in Côte d'Ivoire. *Agroforestry Systems* 27:259-267.
- Holt Giménez, E. 2002. Measuring farmers' agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua: a case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93:87-105.

- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 1988. Curso regional sobre nutrición mineral del café. San José, Costa Rica. Memora de del curso. 271 p.
- Jalonen, R.; Timonen, S.; Sierra, J.; Nygren, P. 2013. Arbuscular mycorrhizal symbioses in a cut-and-carry forage production system of legume tree *Gliricidia sepium* and fodder grass *Dichanthium aristatum*. *Agroforestry systems*, Springer Verlag, 87(2):319-330.
- Jaramillo-Robledo, A.; Chaves-Córdoba, B. 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* 50(2): 97-105.
- Leblanc, H.A.; McGraw, R.L.; Nygren, P. 2007. Dinitrogen-fixation by three neotropical agroforestry tree species under semi-controlled field conditions. *Plant and Soil* 291(1-2):199-209.
- Lin, B.B. 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(4): 510-518.
- López-Bravo, D.F.; Virginio-Filho, E.d.M.; Avelino, J. 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions *Crop Protection* 38:21-29.
- Lundgre, B. 1979. Research strategy for soils in agroforestry. *In Expert consultation on soils research in agroforestry*, Nairobi, Kenya, ICRAF, p. 523-538.
- Maestri M, Santos-Barros, R. 1981. *Ecofisiología de cultivos tropicales*. IICA. San José, Costa Rica. 50 pp.
- Meylan, L. 2012. Design of cropping systems combining production and ecosystem services: developing a methodology combining numerical modeling and participation of farmers. Tesis PhD. Montpellier, Francia, Montpellier Supagro. 145 p.
- Muschler, R. 1999. Árboles en cafetales Turrialba, Costa Rica. CATIE. 139 p.
- Myers, R.J.K.; Cuevas, E.; Brossard, M. 1994. The synchronization of nutrient mineralization and plant nutrient demand. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. Woormer, PL; MJ (Eds.). CAB International, Wallingford, UK P 81-116.
- Nygren, P.; Fernández, M.; Harmand, J.M.; Leblanc, H. 2012. Symbiotic dinitrogen fixation by trees: an underestimated resource in agroforestry systems? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 94(2-3):123-160.
- Ovalle-Rivera, O.; Läderach, P.; Bunn, C.; Obersteiner, M., Schroth, G. 2015. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS ONE* 10(4): e0124155. doi:10.1371/journal.pone.0124155.
- Padovan, M.P.; Cortez, V.J.; Navarrete, L.F.; Navarrete, E.D.; Deffner, A.C.; Centeno, L.G.; Munguía, R., Barrios, M.; Víchez-Mendoza, J.S.; Vega-Jarquín, C.; Costa, A.N., Brook, R.M.; Rapidel, B. 2015. Root distribution and water use in coffee shaded with *tabebuia rosea bertol.* And *simarouba glauca* dc. Compared to full sun coffee in sub-optimal environmental conditions. *Agroforestry Systems*. 89(5): 857-868.
- Palm, C. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agroforestry Systems* 30(1):105-124.
- Patin, J.; Mouche, E.; Ribolzi, O.; Chaplot, V.; Sengtahevanghoung, O.; Latsachak, K.O. 2012. Analysis of runoff production at the plot scale during a long term survey of a small agricultural catchment in Lao PDR. *J. Hydrol.* 426–427, 79–92.
- Porras Vanegas, C.M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 131 p.
- Rapidel B.; Allinne C.; Cerdan C.; Meylan L.; Virginio Filho E.D.M.; Avelino J. 2015. *In: Montagnini F.; Somarriba E.; Murgueitio E.; Fassola H.; Eibl B. (Eds.). Sistemas Agroforestales: Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales*. Colombia: CATIE, p. 5-20. (Serie técnica. Informe técnico CATIE, 402).

- Ribolzi, O.; Patin, J.; Bresson, L.M.; Latschack, K.O.; Mouche, E.; Sengtaheuanghoung, O.; Silvera, N.; Thiébaux, J.P.; Valentin, C. 2011. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. *Geomorphology* 127, 53–63.
- Rosenzweig, C.; Hillel, D. 1998. Climate change and the global harvest: potential impacts of the greenhouse effect on agriculture. Oxford University Press, New York. 324 p.
- Sánchez de León, Y.; De Melo, E.; Soto, G.; Jonson Maynard, J.; Lugo Pérez, J. 2005. Earthworm population, microbial biomass and production in different experimental coffee agroforestry management systems. University of Idaho-CATIE. Costa Rica. 32p.
- Shi, Z.H.; Yan, F.L.; Li, L.; Li, Z.X.; Cai, C.F. 2010. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena* 81:240–248.
- Siles, P.; Harmand, J.M.; Vaast, P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. Agroforest system. Published online. 18 p.
- Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.
- Truman, C.C.; Shaw, J.N.; Reeves, D.W. 2005. Tillage effects on rainfall partitioning and sediment yield from an Ultisol in central Alabama. *J. Soil Water Conserv.* 60:89–98.
- Tully, K.L.; Lawrence, D.; Scanlon, T.M. 2012. More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 161:137–144.
- Tully, K.L.; Wood, S.A.; Lawrence, D. 2013. Fertilizer type and species composition affect leachate nutrient concentrations in coffee agroecosystems. *Agroforest Syst* 87:1083–1100.
- van Kanten, R.; Vaast, P. 2006. Transpiration of Arabica Coffee and Associated Shade Tree Species in Sub-optimal, Low-altitude Conditions of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 67(2):187–202.
- Verbist, B.; Poesen, J.; van Noordwijk, M.; Widiyanto Suprayogo, D.; Agus, F.; Deckers, J. 2010. Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape. *CATENA* 80(1):34–46.
- Villatoro Sánchez, M.; Le Bissonnais, Y.; Moussa, R.; Rapidel, B. 2015. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica. *Journal of Hydrology* 523: 409–426.
- Wei, L.; Zhang, B.; Wang, M. 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. *Agric. Water Manage.* 94:54–62.
- Wintgens, J.N. 2004. Coffee: Growing, Processing, Sustainable production. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH. 976 p. ISBN: 3-527-30731-1.
- Xu, Q.X., Wang, T.W., CAI, C.F., Li, Z.X., Shi, Z.H., Fang, R.J., 2013. Response of runoff and soil erosion to vegetation removal and tillage on steep lands. *Pedosphere* 23(4), 532–541.
- Yan, F.L., Shi, Z.H., Li, Z.X., Cai, C.F., 2008. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China. *Soil Till. Res.* 100:34–41.

10. Anexos

Anexo 1. Relación entre la precipitación, escorrentía superficial, humedad del suelo y pérdida de suelo.

a) Pérdida de suelo y su relación con la escorrentía superficial y contenido de humedad del suelo

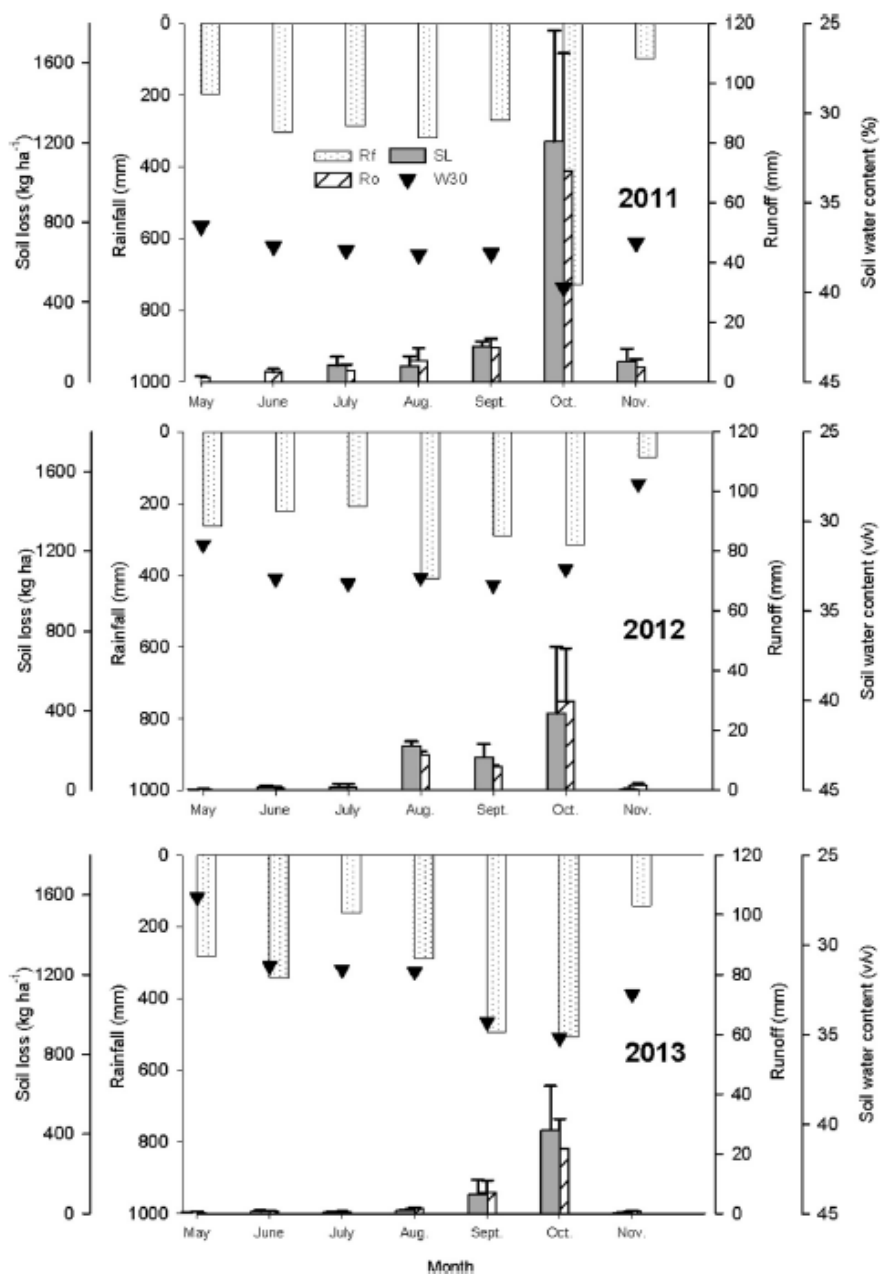


Fig. 3. Monthly runoff depth (Ro), soil loss (SL), soil water content at a depth of 30 cm (W30) and total rainfall (Rf). Vertical bars are one standard deviation.

Rf= precipitación total, **Ro**= profundidad de la escorrentía mensual, **SL**= pérdida de suelo, **W30**= contenido de agua del suelo a una profundidad de 30 cm.

Fuente: Villatoro Sánchez, M.; Le Bissonnais, Y.; Moussa, R.; Rapidel, B. 2015. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica. *Journal of Hydrology* 523: 409-426

b) Sombra, cobertura de suelo y erosión del suelo

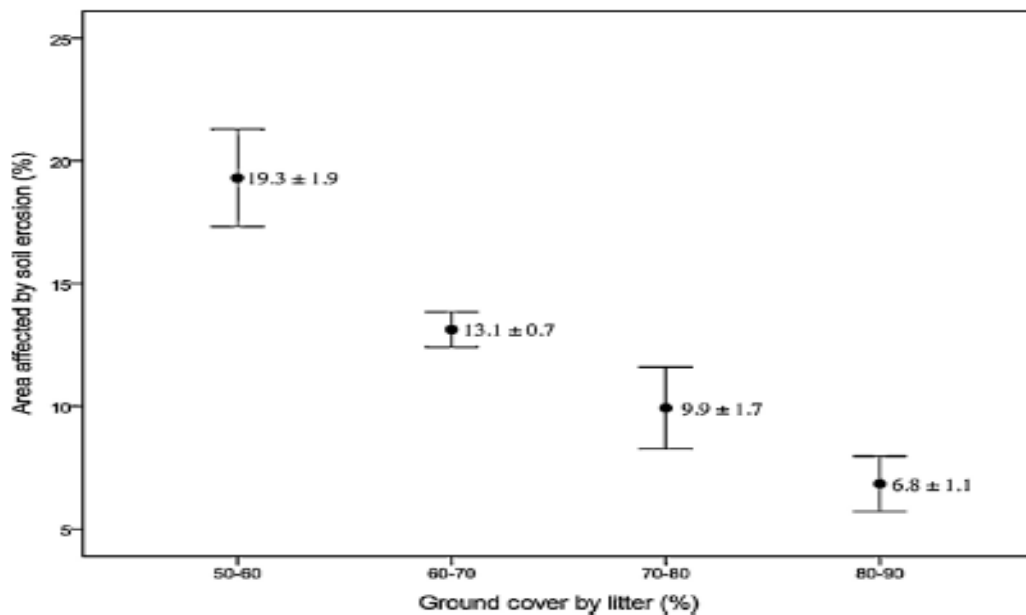


Fig. 6. Soil affected by erosion with increasing of litter layer in an agroforestry system of coffee cultivation with *Inga spp* and *Musa spp* shade trees ($n_{50-60} = 6$, $n_{60-70} = 4$, $n_{70-80} = 11$, $n_{80-90} = 10$). Values are mean ± standard error.

Nota: En la figura se puede observar que a medida que aumenta la cobertura de suelo, hay una disminución en cuanto a las áreas afectadas por erosión, lo se traduce en una reducción en las pérdidas de suelo.

C) Porcentaje de pendiente y su relación con la erosión del suelo

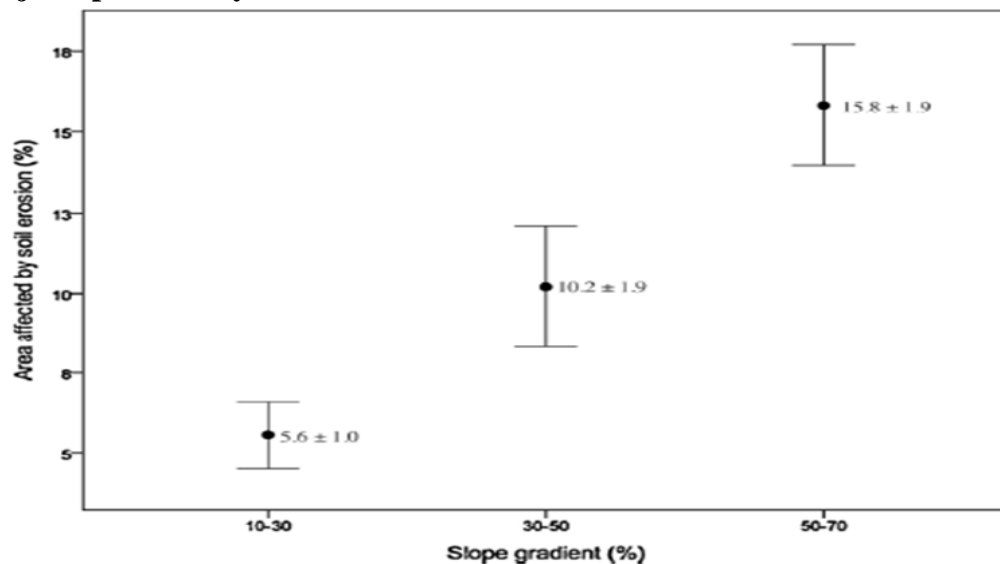


Fig. 5. Soil affected by erosion with increasing slope gradient in an agroforestry system of coffee cultivation with *Inga spp* and *Musa spp* shade trees ($n_{10-30} = 12$, $n_{30-50} = 12$, $n_{50-70} = 9$). Values are mean ± standard error.

Fuente 1b y 1c: Blanco Sepúlveda, R.; Aguilar Carrillo, A. 2015. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga spp* and *Musa spp*) in Northern Nicaragua. Agriculture, Ecosystems and Environment 210:25-35.

Anexo 2. Fincas agroecológicas (uso de árboles como una de las prácticas principales)

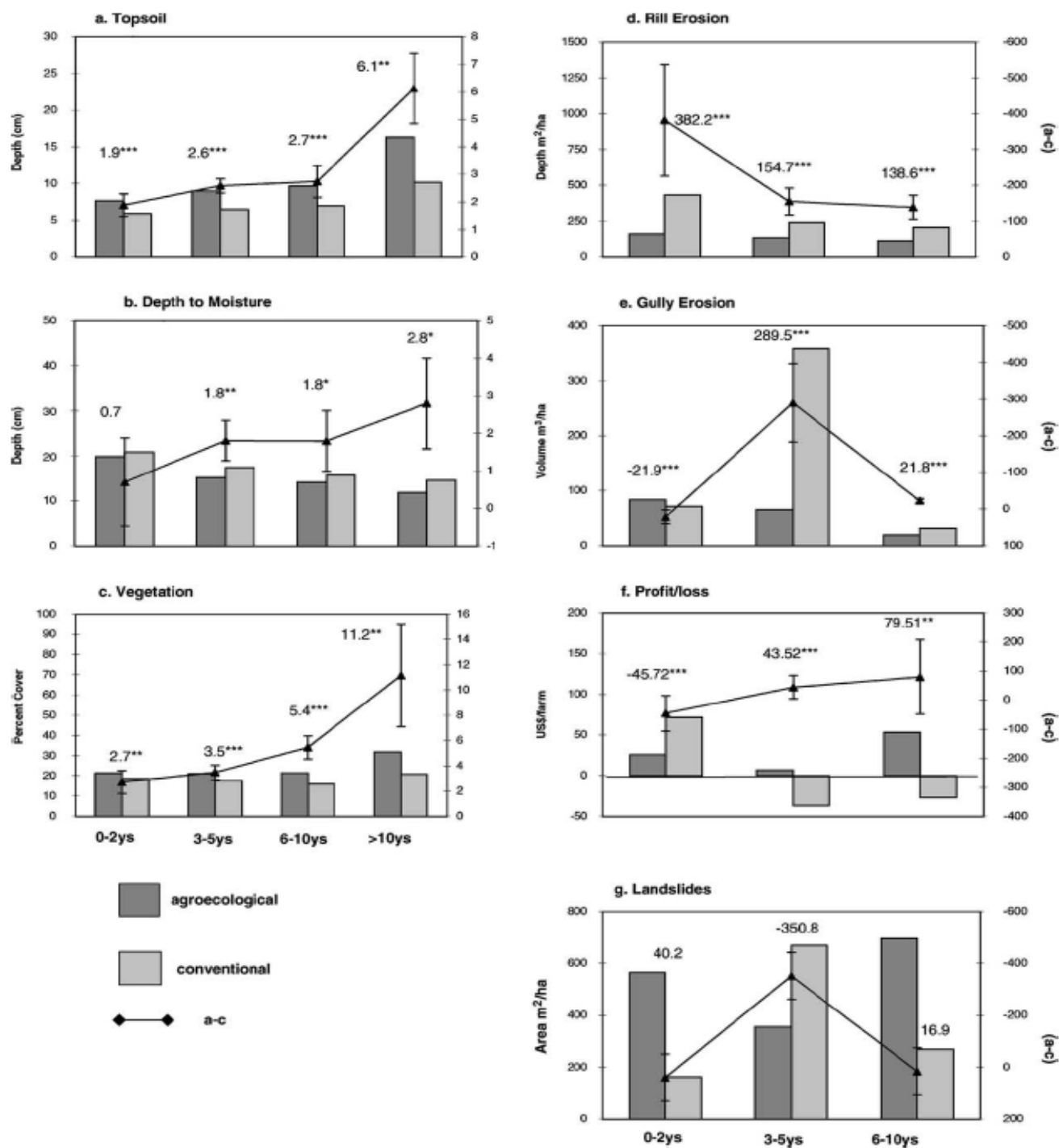


Fig. 2. Agroecological resistance and time under sustainable practices for agroecological farms. Resistance is the average of the differences between agroecological and conventional plots (a – c). There were 68, 244, 84, and 8 paired plots in 0–2, 3–5, 6–10 and >10 year categories, respectively.

Fuente: Holt Giménez, E. 2002. Measuring farmers' agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua: a case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93:87-105.

Anexo 3. Efecto de la sombra sobre la cantidad de materia orgánica en el suelo (hojarasca y ramas)

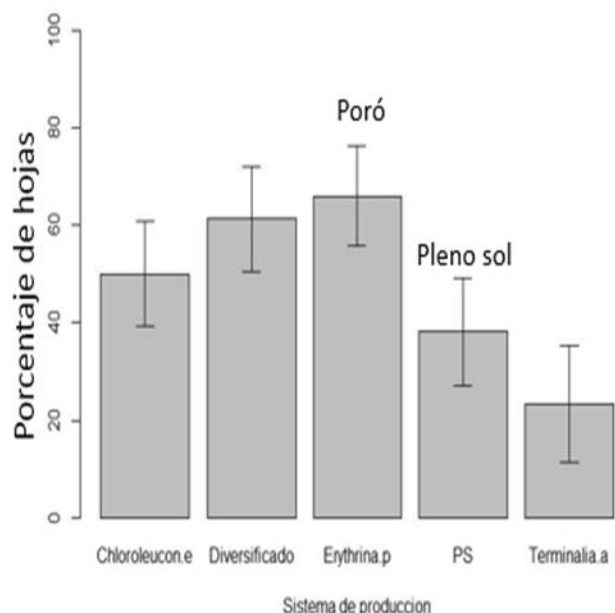


Ilustración 10: Porcentaje de hojas sobre el suelo por sistema de producción; las barras de errores corresponden al error estándar.

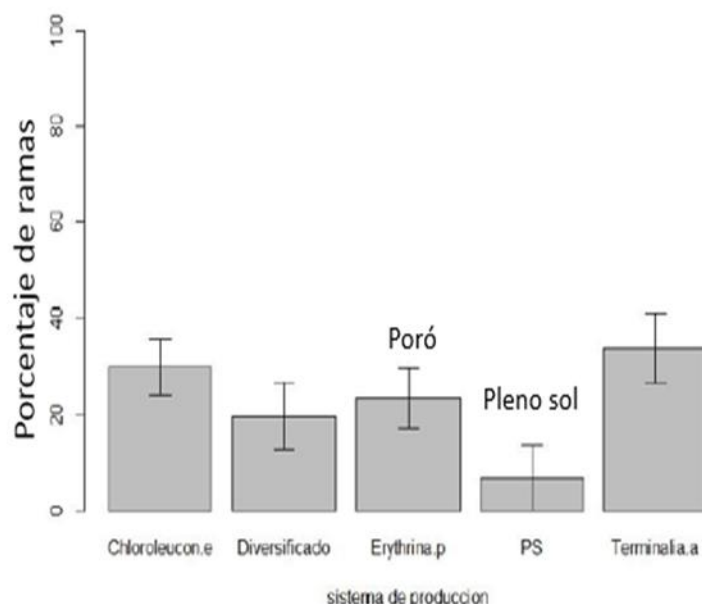


Ilustración 11: Porcentaje de ramas sobre el suelo por sistema de producción; las barras de errores corresponden a la error estándar.

Fuente: Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía, CIRAD. 32 p.

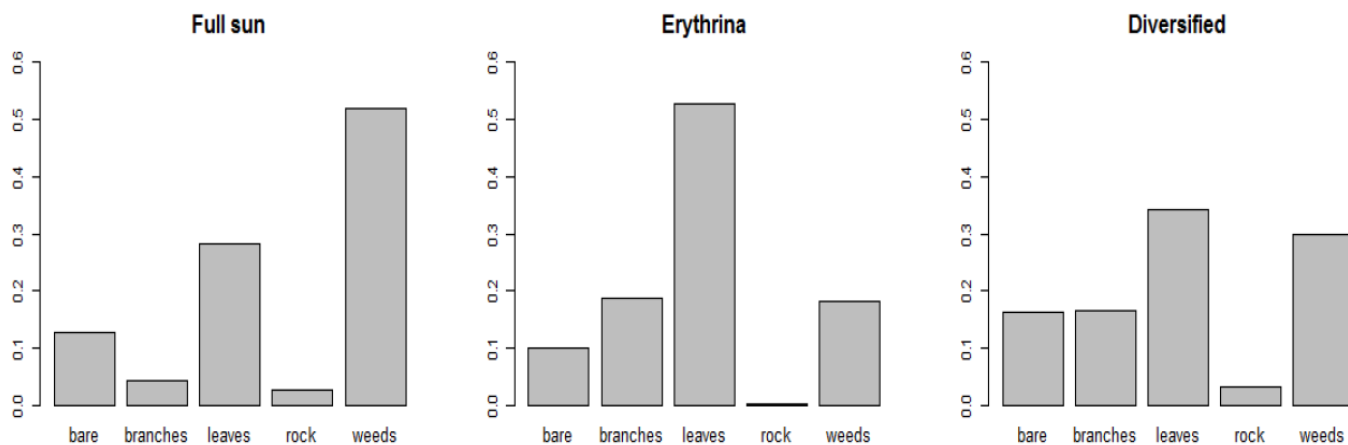


Figure 8: Soil cover characterisation of the different shade systems studied (as a fraction of soil cover): plantations in full sun, associated with *E. poeppigiana* or associated with a multi-specific canopy. Based on a total of 460 observations.

Fuente: Cabon, M. 2015. Effect of shade on microclimate, soil fertility and productivity of coffee trees in Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Report Internship job. CIRAD-CATIE. 31 p.

Anexo 4. Efecto de la sombra sobre la humedad del suelo

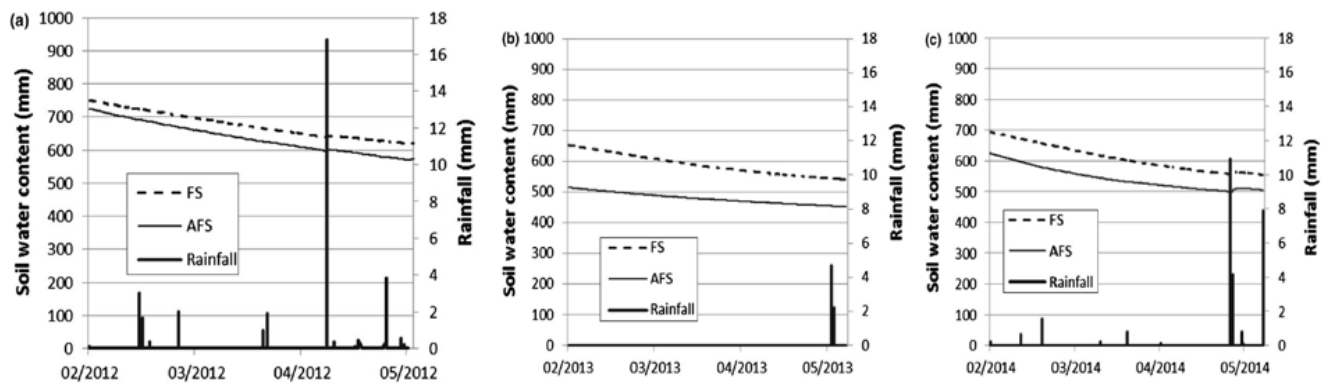


Fig. 8 A comparison of soil water content in the whole soil profile (2000 mm) from the mean of three trenches in the full sun and six trenches in agroforestry in the **a** 2012, **b** 2013 and **c** 2014 dry periods

Fuente: Padovan, M.P.; Cortez, V.J.; Navarrete, L.F.; Navarrete, E.D.; Deffner, A.C.; Centeno, L.G.; Munguía, R., Barrios, M.; Víchez-Mendoza, J.S.; Vega-Jarquín, C.; Costa, A.N., Brook, R.M.; Rapidel, B. 2015. Root distribution and water use in coffee shaded with *tabebuia rosea bertol.* And *simarouba glauca dc.* Compared to full sun coffee in sub-optimal environmental conditions. *Agroforestry Systems*. 89(5): 857-868.

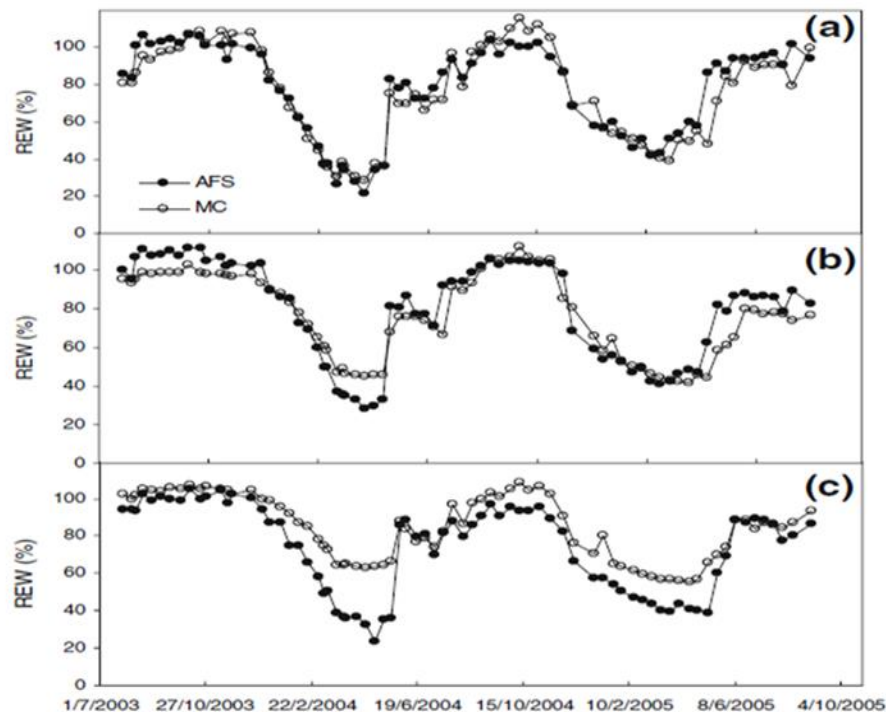


Fig. 4 Time course of the relative soil extractable water (REW) at depths of **a** 0–60 cm, **b** 60–120 cm and **c** 120–150 cm in a coffee monoculture (MC) and a coffee agroforestry system (AFS) in San Pedro de Barva, Costa Rica, measured from July 2003 to October 2005

Fuente: Siles, P.; Harmand, J.M.; Vaast, P. 2009. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforest system*. Published online. 18 p.

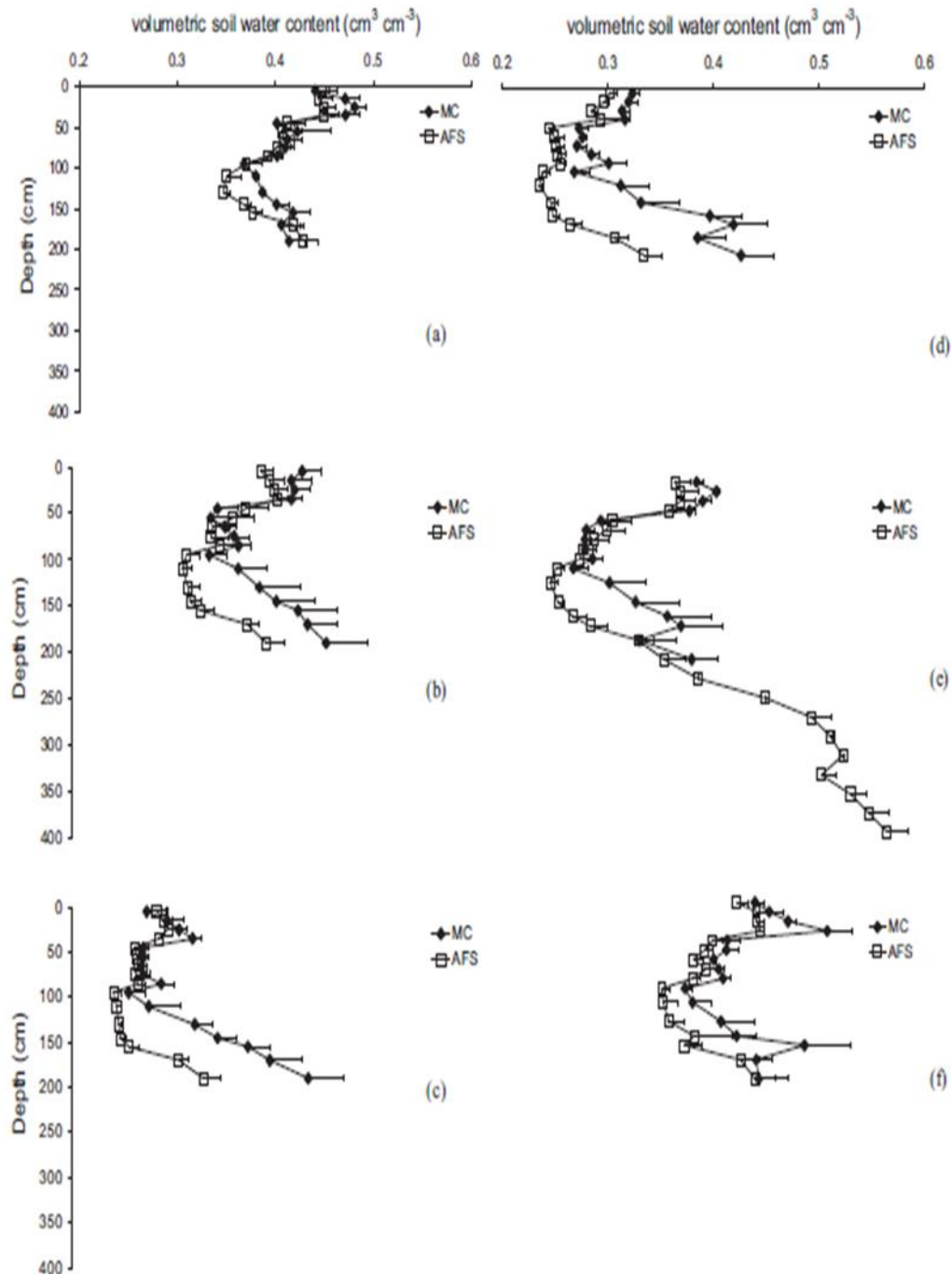


Fig. 2. Mean soil water content profiles at 6 dates in the MC and AFS plots. (a) End of the 2003 rainy season (November 2003); (b), (c), (d) dry season 2004 (January, March and April 2004, respectively); (e), (f) beginning of the rainy season 2004 (May and June 2004, respectively). Bars represent standard errors.

Fuente: Cannavo, P.; Sansoulet, J.; Harmand, J.M.; Siles, P.; Dreyer, E.; Vaast, P. 2011. Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140(1-2):1-13.

Anexo 5. Efecto de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de lluvia

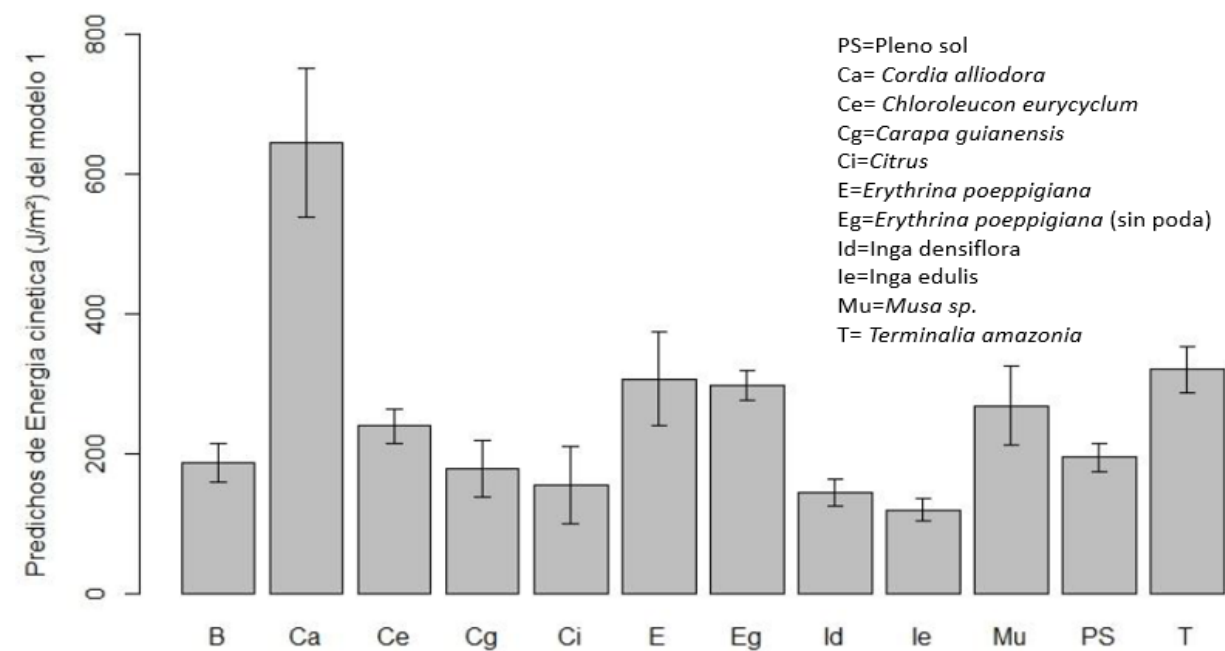
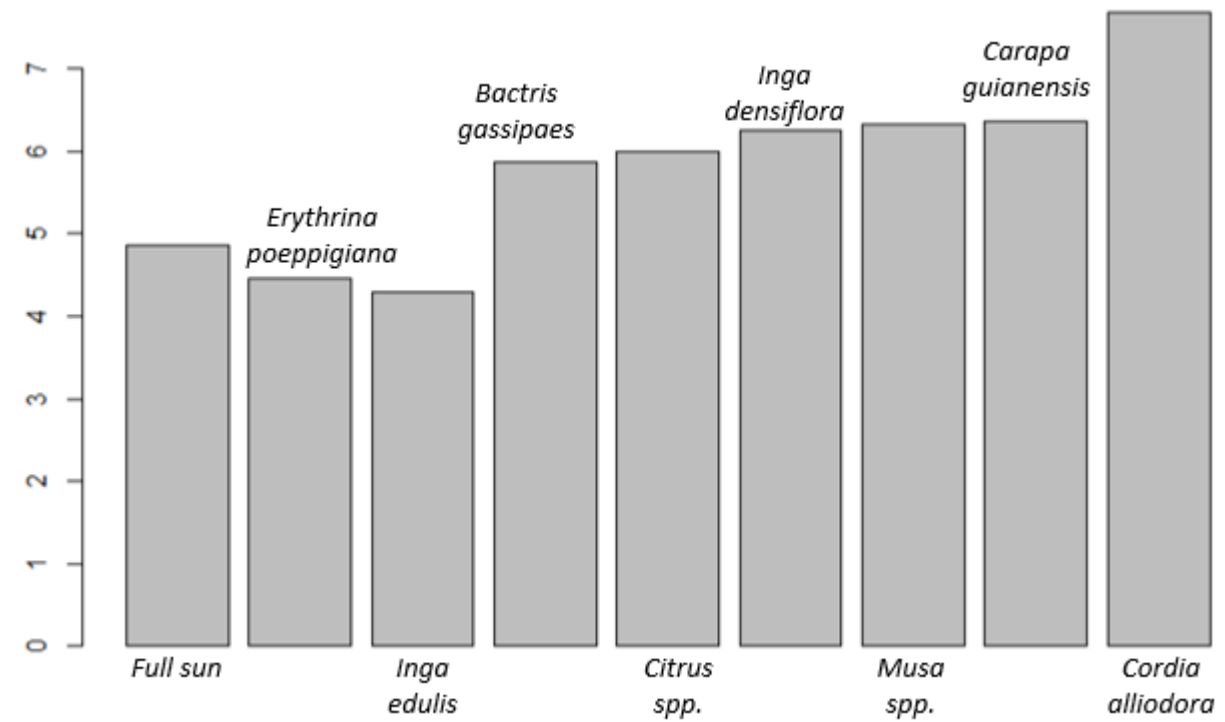


Ilustración 8: Energía cinética de la gotas de lluvia predicha en función de la especie de árbol o del pleno sol; las barras de error corresponden a la error estándar.

Fuente: Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.



Fuente: Cabon, M. 2015. Effect of shade on microclimate, soil fertility and productivity of coffee trees in Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Report Internship job. CIRAD-CATIE. 31 p.

Anexo 6. Relación entre mineralización y nitrificación de la materia orgánica del suelo en cafetales con diferentes especies de sombra y pleno sol.

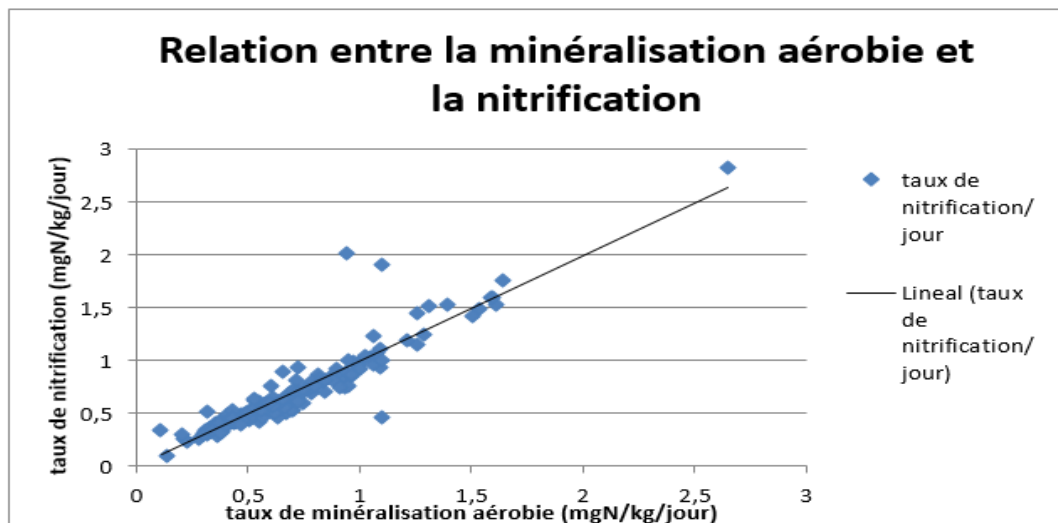


Figure 15 : Relation entre le taux de minéralisation aérobie et le taux de nitrification pour l'ensemble des carottes

Figura 15 : Relación entre la tasa de mineralización aeróbica y tasa de nitrificación para todas las muestras de suelo (muestras de suelo en forma de zanahoria), en diversos tipos de manejo de café, ensayo de agroforestería de CATIE/

Echanges vers les parcelles ----- Taux (mgN/kg/jour)	CMC	CMCnd	EBO	EBOnd	EMC	EMCnd	SMC	SMCnd	TBO	TBOnd	TMC	TMCnd
taux de minéralisation anaérobique/jour	4,88 B	5,22 B	4,2 B	2,9 BC	5,64 B	9,8 A	2,5 C	1,7 C	3,9 BC	4,4 C	5,31 B	5,62 B
taux de minéralisation aérobie/jour	0,83 A	0,94 A	0,8 A	0,6 B	0,84 A	1,07 A	0,58 AB	0,44 AB	0,48 B	0,39 B	0,58 AB	0,73B
taux de nitrification/jour	0,79 B	0,92 B	0,83 A	0,56 B	0,79 A	1,07 A	0,58 AB	0,43 AB	0,47 B	0,36 AB	0,70 B	0,69 B

CMC= Cashá manejo convencional, **EBO=** Erythrina bajo orgánico, **EMC=** Erythrina medio convencional, **SMC=** Sin sombra medio convencional, **TBO=** Terminalia bajo orgánico, **TMC=** Terminalia medio convencional, **nd=** muestras de suelo de referencias

Tableau 5 : Valeurs des taux de minéralisation et nitrification et groupes de Tukey dans les parcelles de destination et dans les carottes de référence (*nd)

Tabla 5. Tazas de mineralización aeróbica y nitrificación en diferentes tipos de manejo de café, ensayo de agroforestería de CATIE. Diferencias significativas entre grupos fueron determinados por una prueba Tukey y son indicados con letras A, B y C. nd =muestras de suelo de referencia (* nd)

Fuente: Baraër, T. 2013. Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, CIRAD/CATIE. 36 p.

Anexo 7. Relación entre la cantidad de árboles en el sistema y la pérdida de nitrógeno: las pérdidas por lixiviación disminuyen con el aumento de la biomasa en sistemas agroforestales de café

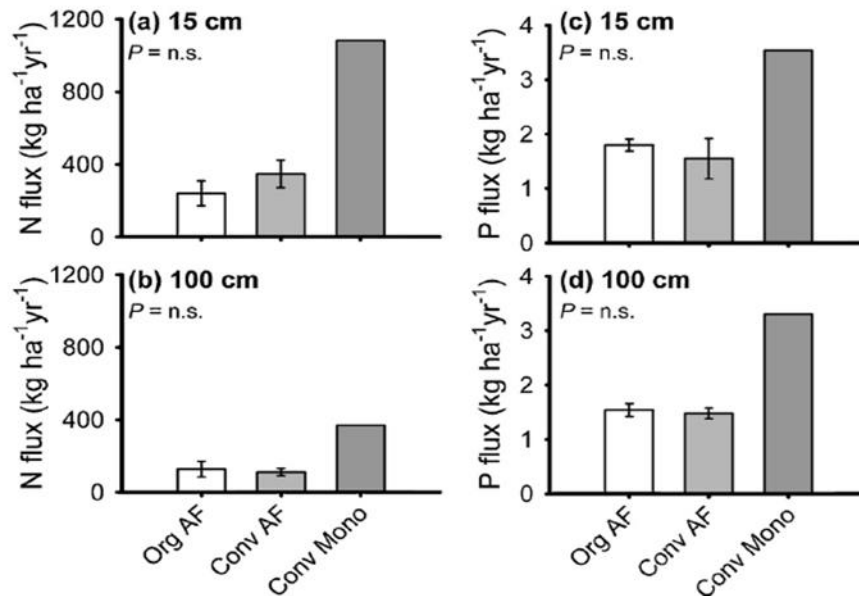


Fig. 1. Annual nitrogen and phosphorus losses at 15 and 100 cm in organically and conventionally managed coffee agroforests compared to near-by coffee monoculture. Nitrogen loss at (a) 15 cm and (b) 100 cm and phosphorus flux at (c) 15 cm and (d) 100 cm in organic and conventional agroforests. Nutrient concentrations as measured in leachate from tension lysimeters were combined with drainage calculated from a water balance model to estimate N and P losses. Monthly losses were summed over the course of the study year. Error bars represent the standard error of the annual mean. Nutrient losses from a near-by coffee monoculture were estimated using the same methods as on the agroforests and are shown for comparison.

Org AF= Sistema agroforestal con café y manejo orgánico, Conv AF= Sistema agroforestal con café y manejo convencional, Conv Mono= Café cultivado sin sombra y manejo convencional.

Fuente: Tully, K.L.; Lawrence, D.; Scanlon, T.M. 2012. More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 161:137-144.

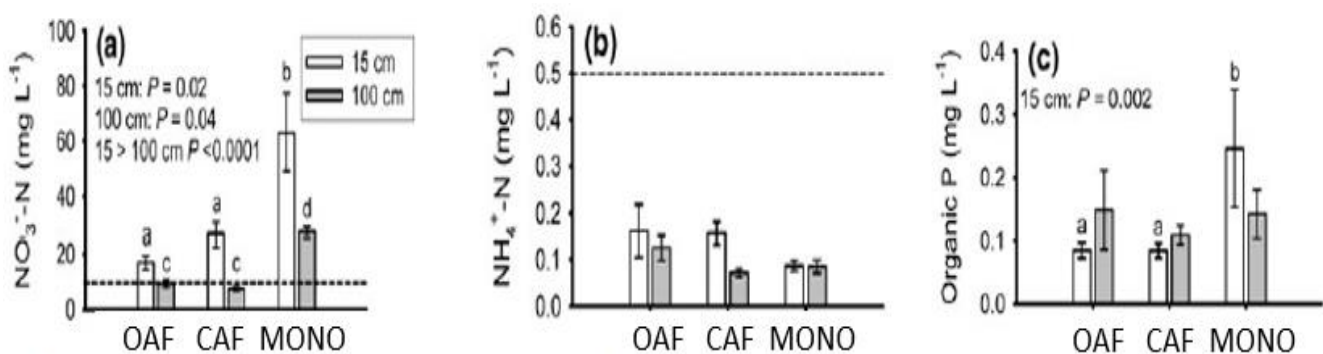
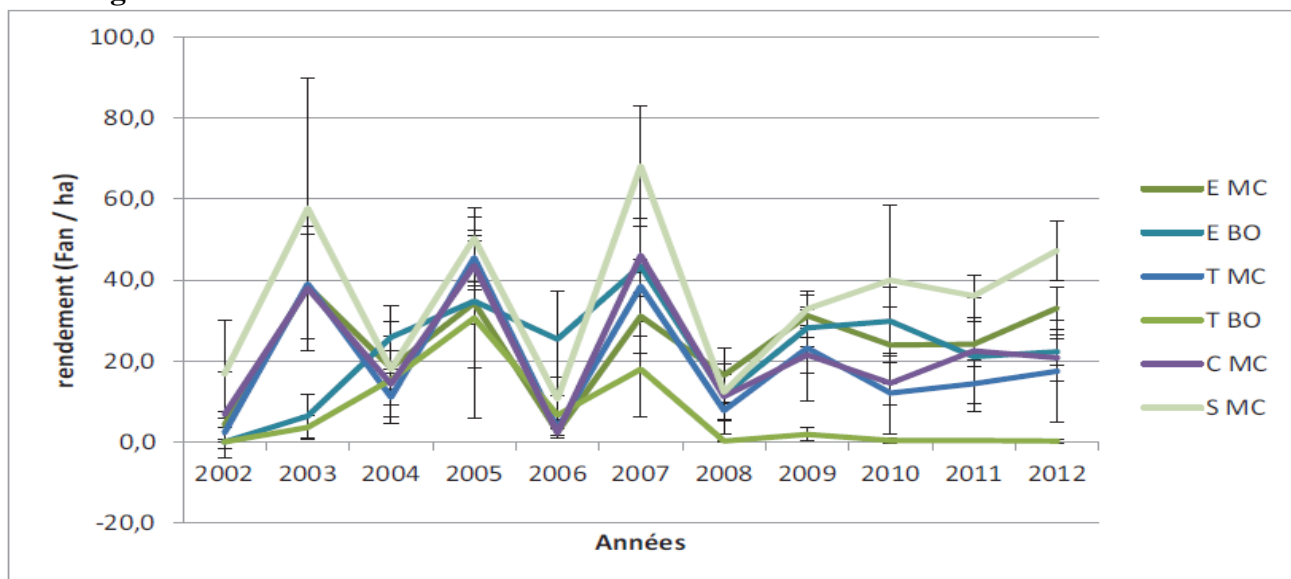


Fig. 3 Mean monthly concentrations of a NO₃⁻-N, b NH₄⁺-N, and c Organic P in leachate collected from tension lysimeters at 15 (white bars) and 100 cm (grey bars) depth in organic agroforests (OAF), conventional agroforests (CAF), and coffee monocultures (MONO). Dashed lines represent the World Health Organization standards for drinking water quality (10 mg NO₃⁻-N L⁻¹ and 0.5 mg NH₄⁺-N L⁻¹). Values presented are means across farms (within the same management type) and sampling (n = 13). Bars represent standard error of the mean. Values that were significantly different at P < 0.05 are indicated by different letters

Fuente: Tully, K.L.; Wood, S.A.; Lawrence, D. 2013. Fertilizer type and species composition affect leachate nutrient concentrations in coffee agroecosystems. *Agroforest Syst* 87:1083-1100.

Anexo 8. Rendimientos de café (figura 11) y resultados del análisis de contenido de nitrógeno en la tabla bajo la figura. Observando ambos se puede comparar para ver la que los datos de contenido de nitrógeno están acordes con los datos de rendimiento.



Fan : fanegas

Figure 11 : Rendements en café dans les six types de parcelles étudiées pour la période 2002-2012

Source : De Melo E. (2013a)

Row Labels	Average of N-mass branches	Average of N-mass cep	Average of N-mass total	Average of N-mass feuilles
SMC	4,58	22,58	32,05	4,89
CMC	2,10	15,22	19,77	2,46
EMC	3,71	17,72	26,62	5,18
TMC	1,61	11,06	14,84	2,17
EBO	2,42	17,47	23,49	3,59
TBO	0,58	8,84	9,64	0,21

CMC= Cashá manejo convencional, **EBO=** Erythrina bajo orgánico, **EMC=** Erythrina medio convencional, **SMC=** Sin sombra medio convencional, **TBO=** Terminalia bajo orgánico, **TMC=** Terminalia medio convencional

Annexe 4 : Minéralomasse (C:N) en azote des trois compartiments par parcelle étudiée

Nota: de los tratamientos con sombra, Erythrina con manejo medio convencional fue quién obtuvo los niveles de nitrógeno más cercanos al pleno sol y lo mismo puede observarse con los rendimientos de los últimos 5 años.

Fuente: Baraër, T. 2013. Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, CIRAD/CATIE. 36 p.

Anexo 9. Relación entre la sombra y la composición química del grano de café

Tableau 1. Influence de l'ombrage sur la composition chimique des fèves de café vert. / Influencia de la sombra en la composición química de los granos de café oro.

AOM/COS	CHL (%)	CAF (%)	TRI (%)	SAC (%)	pH	ACID	MG (%)
1	7,73	1,28	0,94	6,74	5,50	7,30	16,40
2	7,69	1,32	0,90	6,66	5,50	7,00	16,70
3	7,68	1,32	0,95	6,53	5,54	6,70	16,00
4	7,75	1,36	0,88	6,79	5,50	6,90	16,90
Moyenne Promedio	7,71	1,32	0,92	6,68	5,51	6,98	16,50
SOM/SIS							
1	7,01	1,27	1,00	6,53	5,56	6,10	16,30
2	6,92	1,27	1,03	6,43	5,59	5,60	16,70
3	7,07	1,28	0,96	6,54	5,57	6,00	16,70
4	7,08	1,27	0,99	6,44	5,54	6,20	16,90
Moyenne Promedio	7,02	1,27	1,00	6,49	5,57	5,98	16,65

AOM/COS = avec ombrage/con sombra; SOM/SIS = sans ombrage/ sin sombra; CHL = acides chlorogéniques/ácidos clorogénicos; CAF = caféine/caféina; TRI = trigonelline/trigonelina; SAC = saccharose/sacarosa; ACID = acidité exprimée en ml de NaOH 0,1N/5 g de café vert/acidez expresada en ml de NaOH 0,1N/5 g de café oro; MG = matière grasse/grasa; 1, 2, 3, 4 = répétitions/replicaciones.

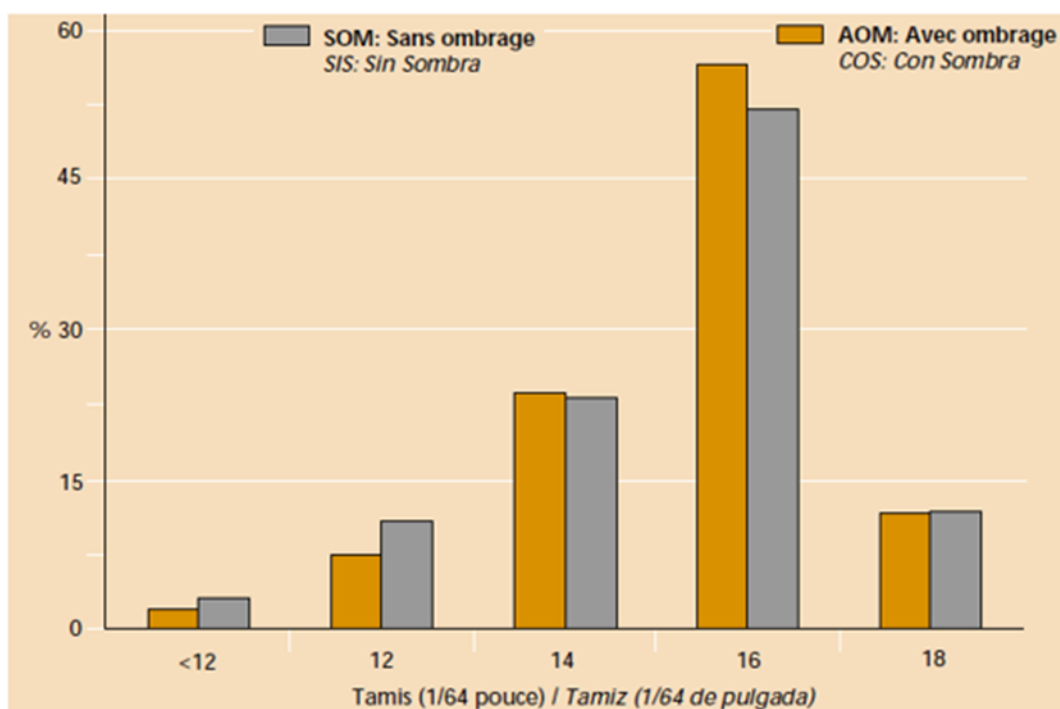


Figure 1. Influence de l'ombrage sur la granulométrie (Catuai). / Influencia de la sombra en la granulometría (Catuai). AOM = avec ombrage; SOM = sans ombrage. COS = con sombra; SIS = sin sombra

Fuente: Guyot, B.; Gueule, D.; Manez, J.C.; Perriot, J.J.; Giron, J.; Villain, L. 1996. Influence de l'altitude et de l'ombrage sur la qualité des cafés Arabica. *Qualite*, 273-283.

Anexo 10. Efecto de la sombra sobre la cantidad de lombrices en el suelo

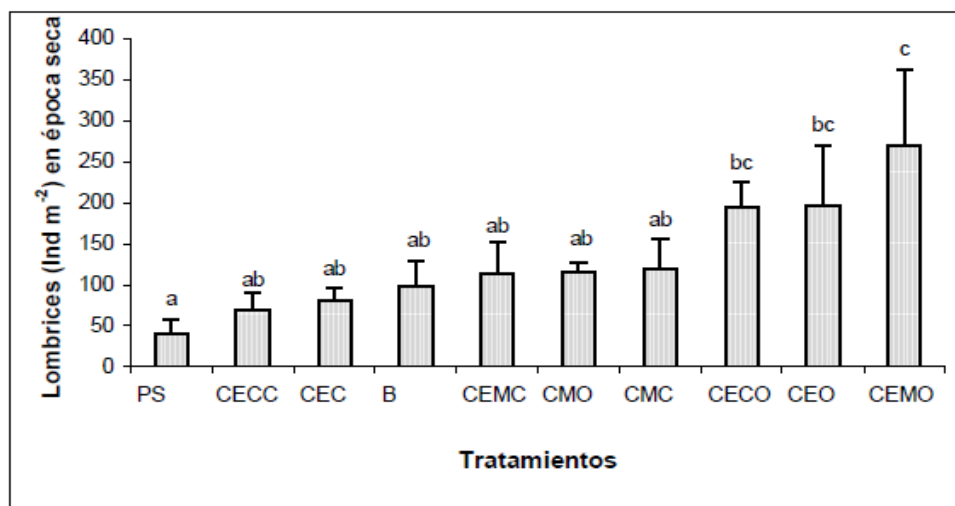


Figura 24. Recuento se Lombrices en época seca (medias de individuos m⁻²) en las fincas estudiadas, dentro del Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica, 2005.

Nota: B= Bosque, CEC= Café–Erythrina–Convencional, CECC= Café–Erythrina–Cordia Convencional, CECO= Café–Erythrina–Cordia Orgánico, CEMC= Café–Erythrina–Musa Convencional, CEMO= Café–Erythrina–Musa Orgánico, CEO= Café–Erythrina–Orgánico, CMC= Café–Musa Convencional, CMO= Café–Musa Orgánico, PS= Pleno Sol. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

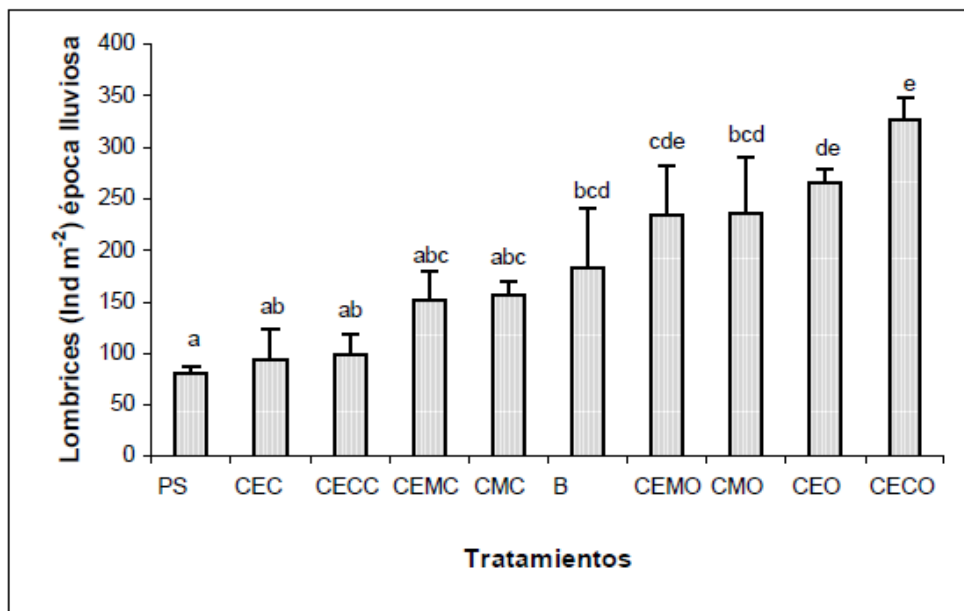


Figura 25. Recuento se Lombrices en época lluviosa (medias de individuos m⁻²) en las fincas estudiadas, dentro del Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica, 2005.

Fuente: Porras Vanegas, C.M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 131 p.

Anexo 11. Efecto de la sombra sobre la cantidad de actinomicetos o actinobacterias en el suelo

Cuadro 29. Valores de los índices de diversidad (\pm EE) para actinomicetos en época seca en las fincas estudiadas, dentro del Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica, 2005.

Estructura	Individuos (p=0,3745)	Morfotipos (p=0,0180)	Shannon (p=0,0282)	Simpson (p=0,0727)
B	45,33 \pm (21,26)	3,67 \pm (1,2) d	0,85 \pm (0,18) cd	0,41 \pm (0,05)
CEC	801,33 \pm (658,08)	5,67 \pm (0,67) bcd	0,77 \pm (0,32) d	0,63 \pm (0,17)
CECC	62 \pm (34)	4 \pm (0) cd	0,93 \pm (0,17) bcd	0,46 \pm (0,12)
CECO	98,33 \pm (21,21)	9 \pm (1,53) a	1,67 \pm (0,23) a	0,23 \pm (0,06)
CEMC	55,33 \pm (15,81)	7,67 \pm (0,33) ab	1,67 \pm (0,03) a	0,21 \pm (0,02)
CEMO	56,67 \pm (16,34)	5,67 \pm (0,67) bcd	1,21 \pm (0,2) abcd	0,38 \pm (0,1)
CEO	127 \pm (68,2)	6,33 \pm (0,88) abcd	1,44 \pm (0,1) ab	0,27 \pm (0,02)
CMC	65 \pm (11,72)	7 \pm (1) abc	1,39 \pm (0,19) abc	0,31 \pm (0,06)
CMO	94 \pm (23,76)	8,67 \pm (0,88) a	1,61 \pm (0,07) a	0,25 \pm (0,02)
PS	44,67 \pm (18,22)	5,67 \pm (1,33) bcd	1,34 \pm (0,27) abcd	0,29 \pm (0,12)

Nota: B= Bosque, CEC= Café–Erythrina–Convencional, CECC= Café–Erythrina–Cordia Convencional, CECO= Café–Erythrina–Cordia Orgánico, CEMC= Café–Erythrina–Musa Convencional, CEMO= Café–Erythrina–Musa Orgánico, CEO= Café–Erythrina–Orgánico, CMC= Café–Musa Convencional, CMO= Café–Musa Orgánico, PS= Pleno Sol. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Fuente: Porras Vanegas, C.M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 131 p.

Anexo 12. Efecto de la sombra sobre la floración y producción de café

Cuadro 3. Floración y producción de café (*Coffea arabica*) de cuatro años de edad en distintos tratamientos de sombra en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica

Variables de producción del cafeto	Tipo de sombra			
	<i>Eucalyptus deglupta</i>	<i>Terminalia ivorensis</i>	<i>Erythrina poeppigiana</i>	Pleno sol
Nudos productivos por bandola	9 b ^(a)	8 a	7 a	7 a
Floración 1 (8/02/02; % del total)	19 a	18 a	20 ab	25 b
Floración 2 (22/02/02; % del total)	78 a	80 a	76 a	72 a
Floración 3 (15/03/02; % del total)	3 a	3 a	4 ab	3 ab
Flores por nudo productivo ^(g)	10 a	10 a	10 a	11 b
Frutos por nudo productivo ^(a)	8 b	8 b	6 a	6 a
Caída de frutos (%) ^(w)	15 a	16 a	28 b	36 c

^(a) Promedios con la(s) misma(s) letra(s) en la misma línea no son significativamente diferentes (prueba de Newman-Keuls; $\alpha = 0,05$); ^(g) número total de flores al 25 de marzo (después de las tres floraciones); ^(a) número de frutos por nudo productivo 24 semanas después de la primera floración; ^(w) caída de frutos calculada 24 semanas después de la primera floración.

Fuente: Angrand, J.; Vaast, P.; Beer, J.; Benjamin, T. 2004. Comportamiento vegetativo y productivo de *Coffea arabica* a pleno sol y en tres sistemas agroforestales en condiciones subóptimas en Costa Rica. Agroforestería en las Américas: 41-42.